

工學博士 學位論文

複合板型 浮消波堤에 의한 波浪制御 및  
動的舉動解析

**Wave Control and Dynamic Behavior Analyses of the  
Floating Breakwaters with the Compound Plate Types**

指導教授 金 度 三

2005年 7月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

尹 熙 冕

# **Wave Control and Dynamic Behavior Analyses of the Floating Breakwaters with the Compound Plate Types**

by

**Hee-Myun Yoon**

Department of Civil & Environmental Engineering  
Graduate School  
Korea Maritime University

## **ABSTRACT**

Recently, the target area for the installation of structures have been changed from shallow water into deep one by reservation and use of the wider coastal region, and development of deep water. Additionally, great emphasis in the improved human life quality has been placed on the necessities for the preservation of the agreeable natural and coastal environments and the development of waterfront, recreation, and resort in the sea. However, the existing gravity-type breakwater did not appropriately cope with the recent changes of circumstances, but required the enormous construction cost for coping with them.

Until now, floating breakwater, which was adequate for the environment and construction cost, has been actively studied in the other countries including Japan. This floating breakwater has been already constructed in many places and satisfactory in poor subsoil and deep water in Japan. Also it showed the same function as a gravity-type breakwater. The floating breakwater is now under construction in Won-Jun fishing port in Masan City. And there are another breakwater plans to be constructed in coastal region in Tongyoung City. So, floating breakwater was considered as a powerful structure for the improvement of water quality in closed coastal region and for the better fishing

ground. Furthermore, it became a point of time to study deeply for the development of the new floating breakwater.

This study was to develop the new floating breakwater which was capable of controlling the longer period waves more efficiently than the existing one and investigate the case studies about the floating breakwater with the various geometric forms in Japan. For the development of the efficient floating breakwater, two-dimensional numerical analyses were conducted and the wave control function and dynamic response also examined for the basic pontoon-typed floating breakwater by using Eigenfunction Expansion Method(EEM) and Source Distribution Method(SDM). The accuracy of the model analysis was proved to be valid by comparing the results of the numerical analysis with those of the hydraulic model test. Comparison of the new floating breakwater of the compound plate type developed in this study with that of the vertical leg plate adopted in Won-Jun fishing port for the harbor tranquility against the wave transformation and dynamic response was done by the numerical analysis and hydraulic experimental results.

According to the results, high variation appeared in the neighborhood of the natural period for the rolling and heaving motions, and transmission wave decreased in the back of the floating breakwater. And the floating breakwater with compound plate types in this study was more efficient for controlling the longer period wave than that in Won-Jun fishing port within the limited construction materials. Efficiency was compared between the floating breakwater with the compound plate types, the floating breakwater in Won-Jun fishing port, and the floating breakwater with the vertical leg plates, by using Source Distribution Method(SDM) which was numerical analysis method for the two-dimensional wave field. The numerical results showed that the floating breakwater with the compound plate types was the best. For two pontoon-typed floating breakwaters moored by dolphin and catenary in three-dimensional wave field of a fixed depth without land boundary, the three-dimensional numerical analysis were examined about dynamic responses and wave transformation according to variation of the incident wave conditions,

wave direction, and draft by using Eigenfunction Expansion Method(EEM) and Boundary Element Method(BEM). The numerical analysis results showed that the draft and the width of floating breakwater influenced on the wave transformations significantly, and the incident wave with longer period transmitted well to the rear of the floating breakwater. In case of changing the incident wave direction for two floating breakwaters, different dynamic responses in short period waves were shown to be occurred by interaction between floating breakwaters in the horizontal and rolling displacement for the horizontal direction. The effects of interaction showed to be relatively small for the longer period. By using the three-dimensional Source Distribution Method(SDM) which was able to apply to the complicated-shape structure, the numerical analysis for one floating breakwater with compound plate types were examined about the non-dimensional wave height and motion according to the wave period and incident wave direction in the three-dimensional wave field. The computed results showed that transmission coefficients were low in the neighborhood of the natural period in the two-dimensional hydraulic model test, but high in the rolling and heaving motions.



# 複合板型浮消波堤에 의한 波浪制御 및 動的舉動解析

尹 熙 晁

韓國海洋大學校 大學院  
土木環境工學科

## 요 약

최근, 보다 넓은 해역공간의 확보와 이용 및 심해역의 개발로 인하여 구조물 설치 대상의 해역이 점점 심해역으로 향하고 있고, 경제발전에 따른 인간생활의 질적향상으로 바다에서의 레크레이션과 리조트, 해역의 쾌적한 자연환경보전과 해역환경의 개선 및 워터프론트의 개발에 대한 필요성이 강조되고 있다. 하지만, 기존의 중력식구조물로서는 이러한 상황변화에 대처할 수 없을 뿐만 아니라 목적을 달성하기 위해서는 막대한 건설비가 소요된다는 단점이 있다. 따라서, 일본을 위시한 많은 외국에서는 이러한 중력식구조물의 기능을 가질 뿐만 아니라, 연약지반상 및 심해역에서도 그 기능을 충분히 발휘할 수 있으며, 환경적인 측면과 경제적인 측면에서 효과적인 부소파제에 대한 연구가 많이 수행되어 왔으며, 그의 시공 예를 많이 볼 수 있다. 현재 국내에서도 마산시 원전어항에 부소파제를 처음으로 도입·시공 중에 있고, 통영시 바다목장의 전면해역 등을 비롯하여 많은 곳에 계획되고 있어, 폐쇄성 해역의 수질개선 및 수산양식활동의 원활한 수행에 충분한 역할을 기대하며, 앞으로 새로운 형식의 부소파제에 대한 연구·개발이 많이 필요한 시점에 있다.

이 연구에서는 기존에 설치된 부소파제에 비해 장주기파랑을 제어할 수 있는 새로

운 형식의 부소파제를 개발하기 위하여, 구조형식의 변화를 준 일본의 부소파제 설치 사례를 조사하고 기술하였으며, 효과적인 형식의 부소파제를 개발하기 위한 2차원 해석에서는 기본형인 폰툰형 부소파제에 대해 고유함수전개법(Eigenfunction Expansion Method ; EEM)과 특이점분포법(Source Distribution Method ; SDM)을 적용한 수치해석 방법으로부터 그의 파랑제어기능과 동적거동을 검토하였으며, 수리모형실험을 통하여 수치해석법의 타당성을 검증하였다. 그리고 원전어항에서 채용하고 있는 형식(원전 부소파제)인 본체하부의 연직판과 본체 전후에 연직판이 부착된 부소파제(연직판각형 부소파제)와 이 연구에서 새롭게 제안하는 본체 하부의 연직판을 전후연직판의 하부에 수평으로 부착한 부소파제(복합판형 부소파제)에 대한 수치해석과 수리모형실험을 통하여 파랑변형과 동적거동을 비교·검토한 결과, 연직 및 회전운동의 고유주기대에서 큰 운동변위가 나타나며, 구조물의 배후에서 전달파가 감소한다는 것을 확인할 수 있었고, 연직 및 회전운동의 고유주기가 장주기측으로 이동될수록 보다 장주기파랑의 제어에 효율적이라는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 원전 부소파제에 비해 소요재료량의 변화가 크지 않은 범위에서보다 장주기파랑을 제어할 수 있는 복합판형 부소파제를 개발할 수 있었다. 또한, 평면2차원파동장의 수치해석법인 특이점분포법을 적용하여 실험역에 설치된 복합판형 부소파제, 원전 부소파제 및 연직판각형 부소파제에 의한 항내정온도를 비교·검토하여, 복합판형 부소파제의 파랑제어기능의 우수성을 확인할 수 있었다. 그리고, 육역경계가 없는 일정수심의 3차원파동장에 폰툰형 2基의 부소파제가 돌핀계류 및 Catenary계류된 경우에 파랑변형과 동적거동을 고유함수전개법과 경계요소법을 병용한 3차원수치해석으로 입사파랑의 조건과 파향 및 흘수 등을 변화시켜 검토한 결과, 흘수와 부소파제의 폭의 변화는 파랑제어에 큰 영향을 미치며, 입사파의 주기가 길면 부소파제를 통한 전달파가 크다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 2基의 부소파제에 대해 파가 경사지게 입사하는 경우에 단주기측에서 횡방향의 수평변위와 회전변위가 부소파제 사이의 간섭에 의해 상이하게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 장주기측으로 이동할수록 간섭의 효과는 작아진다는 것을 알 수 있었다. 또한, 복잡한 형상의 구조물에도 적용가능한 3차원특이점분포법을 적용한 해석방법으로부터 3차원파동장에 설치된 1基의 복합판형 부소파제를 대상으로 주기와

입사과향각의 변화에 따른 무차원과고분포와 운동변위를 산정한 결과, 2차원수리모형 실험에서 검토된 고유주기대에서 전달율이 가장 낮게 나타나고 연직 및 회전운동은 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

## 目 次

ABSTRACT .....	i
요약 .....	iv
目次 .....	vii
LIST OF PHOTOS .....	x
LIST OF TABLES .....	xii
LIST OF FIGURES .....	xiv
제1장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경과 목적 .....	1
1.2 연구의 구성 .....	3
제2장 부소파제의 설치사례 .....	5
2.1 부소파제 설치사례 .....	5
2.2 구조형식별 부소파제의 특징 및 설치사례 .....	7
2.2.1 폰툰형 부소파제 .....	7
2.2.2 삼중연직벽형 부소파제 .....	8
2.2.3 경사형 부소파제 .....	9
2.2.4 공기제어식 부소파제 .....	9
2.2.5 동요제어식 부소파제 .....	10
2.2.6 내부수류진동형 부소파제 .....	11
2.2.7 FRP제 부소파제 .....	12
제3장 부소파제의 2차원해석 .....	19
3.1 이론적 배경 .....	19
3.2 고유함수전개법 .....	19
3.2.1 지배방정식과 경계조건 .....	20
3.2.2 속도포텐셜의 유도 .....	22
3.2.3 속도포텐셜 미정계수의 결정 .....	23
3.2.4 부소파제의 운동방정식 .....	27

3.3 특이점분포법 .....	30
3.3.1 감쇠파이론 .....	30
3.3.2 지배방정식과 경계조건 .....	31
3.3.3 부체표면상에서의 운동학적 경계조건 .....	32
3.3.4 접속조건 .....	33
3.3.5 부소파제의 운동방정식 .....	33
3.3.6 특이점분포법에 의한 해석 .....	34
3.4 수리모형실험 .....	36
3.4.1 실험방법 .....	36
3.4.2 실험조건 .....	46
3.4.3 폰툰형 부소파제의 실험결과 및 고찰 .....	46
3.4.4 연직판각형 부소파제의 실험결과 및 고찰 .....	55
3.4.5 복합판형 부소파제의 실험결과 및 고찰 .....	74
3.4.6 기존 부소파제와 전달율의 비교 .....	101
 제4장 부소파제의 평면파랑변형해석 .....	103
4.1 이론적 배경 .....	103
4.2 투과성구조물을 포함하는 항만영역에서 파고분포산정법 .....	103
4.3 해석결과 .....	108
4.3.1 해석결과의 검증 .....	108
4.3.2 수치해석을 위한 현지모델항만 .....	113
4.3.3 수치해석 CASE .....	114
4.3.4 수치해석의 결과 .....	115
 제5장 부소파제의 3차원해석(1) .....	129
5.1 이론적 배경 .....	129
5.2 해석이론 .....	129
5.2.1 기본가정 및 경계조건 .....	129
5.2.2 속도포텐셜의 전개 .....	132
5.2.3 Green함수에 의한 미지수의 표시 .....	134
5.2.4 부소파제에 작용하는 유체력 .....	141

5.2.5 부소파제의 운동방정식 .....	147
5.2.6 영역경계면에서의 연속조건 .....	154
5.2.7 제량의 결정 .....	159
5.3 해석결과 .....	162
5.3.1 해석결과의 검증 .....	162
5.3.2 수치해석 조건 .....	164
5.3.3 돌핀계류 부소파제의 해석결과 .....	166
5.3.4 Catenary계류 부소파제의 해석결과 .....	178
<b>제6장 부소파제의 3차원해석(2)</b> .....	193
6.1 이론적 배경 .....	193
6.2 해석이론 .....	193
6.2.1 기본가정 및 경계조건 .....	193
6.2.2 경계적분방정식 .....	196
6.2.3 작용력과 모멘트 .....	198
6.2.4 운동방정식 .....	199
6.3 해석결과 .....	202
6.3.1 해석결과의 검증 .....	202
6.3.2 해석결과 .....	203
<b>제7장 결 론</b> .....	217
7.1 부소파제의 2차원해석 .....	217
7.2 부소파제의 평면파랑변형해석 .....	218
7.3 부소파제의 3차원해석(1) .....	218
7.4 부소파제의 3차원해석(2) .....	219
<b>&lt;참고문헌&gt;</b> .....	220
<b>부록</b> .....	224

## LIST OF PHOTOS.

Photo 2.1. RC제 부소파제의 설치사례. ....	8
Photo 2.2. PCH제 부소파제의 설치사례. ....	8
Photo 2.3. 삼중연직벽형 부소파제의 설치사례. ....	9
Photo 2.4. 경사식 부소파제의 설치사례. ....	9
Photo 2.5. 공기제어식 부소파제의 설치사례. ....	10
Photo 2.6. 동요제어식 부소파제의 설치사례. ....	11
Photo 2.7. 내부수류진동형 부소파제의 설치사례. ....	11
Photo 2.8. FRP제 부소파제의 설치사례. ....	12
Photo 3.1. 2차원 조파시스템. ....	37
Photo 3.2. PTFB. ....	39
Photo 3.3. FBVLP. ....	39
Photo 3.4. FBCPT. ....	39
Photo 3.5. 앵커블록. ....	40
Photo 3.6. 중간싱커. ....	40
Photo 3.7. 파고측정장치. ....	44
Photo 3.8. 운동측정장치. ....	45

Photo 3.9. 장력계. ....	46
Photo 3.10 동적변위계. ....	46
Photo 3.11. 가속도계. ....	46
Photo 3.11. PTFB의 실험상황. ....	48
Photo 3.12. FBVLP의 실험상황. ....	56
Photo 3.13. FBCPT의 실험상황. ....	82



## LIST OF TABLES.

Table 2.1. 廣島縣에 설치된 부소파제. ....	5
Table 2.2. 長崎縣에 설치된 부소파제. ....	5
Table 2.3. 大分縣에 설치된 부소파제. ....	6
Table 2.4. 三重縣에 설치된 부소파제. ....	6
Table 2.5. 愛媛縣에 설치된 부소파제. ....	6
Table 2.6. 熊本縣에 설치된 부소파제. ....	7
Table 2.7. RC제 부소파제의 설치위치와 조건. ....	13
Table 2.8 PCH제 부소파제의 설치위치와 조건. ....	14~16
Table 2.9. 삼중연직벽형 부소파제의 설치위치와 조건. ....	17
Table 2.10. 경사식 부소파제의 설치위치와 조건. ....	17
Table 2.11. 공기제어식 부소파제의 설치위치와 조건. ....	17
Table 2.12. 동요제어식 부소파제의 설치위치와 조건. ....	18
Table 2.13. 내부수류진동형 부소파제의 설치위치와 조건. ....	18
Table 3.1. Froude상사법칙에 의한 물리량의 축척. ....	36
Table 3.2. 실험조건. ....	47
Table 4.1. 수치해석조건. ....	115

Table 5.1. 수치해석의 CASE. ....	165
-----------------------------	-----

## LIST OF FIGURES.

Fig. 3.1. 유체영역의 분할과 좌표계. ....	20
Fig. 3.2. 유체영역의 분할과 좌표계. ....	30
Fig. 3.3. 폰툰형 부소파제([PTFB] : Pontoon typed floating breakwater). ....	39
Fig. 3.4. 연직판각형 부소파제([FBVLP] : Floating breakwater with vertical and leg plates). ....	39
Fig. 3.5. 복합판형 부소파제([FBCPT] : Floating breakwater with the compound plate types). ....	39
Fig. 3.6. 2차원 수조내에서 부소파제의 배치상황. ....	42
Fig. 3.7. 2차원 수조내에서 계측장비의 연결상황. ....	43
Fig. 3.8. 고유주기 (PTFB). ....	49
Fig. 3.9. 반사율과 전달율(PTFB). ....	50
Fig. 3.10. 에너지감쇠율(PTFB). ....	51
Fig. 3.11. Swaying(PTFB). ....	51
Fig. 3.12. Heaving(PTFB). ....	52
Fig. 3.13. Rolling(PTFB). ....	53
Fig. 3.14. 표류거리(PTFB). ....	54
Fig. 3.15. 계류라인의 장력(PTFB). ....	55

Fig. 3.16. 고유주기(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	57
Fig. 3.17. 전달율과 반사율(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	57
Fig. 3.18. 에너지감쇠율(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	59
Fig. 3.19. Swaying(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	59
Fig. 3.20. Heaving(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	60
Fig. 3.21. Rolling(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	61
Fig. 3.22. 표류거리(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	62
Fig. 3.23. 계류라인의 장력(FBVLP, 수평간격 : 5cm). .....	62
Fig. 3.24. 고유주기(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	63
Fig. 3.25. 반사율과 전달율(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	64
Fig. 3.26. 에너지감쇠율(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	65
Fig. 3.27. Swaying(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	65
Fig. 3.28. Heaving(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	66
Fig. 3.29. Rolling(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	67
Fig. 3.30. 표류거리(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	68
Fig. 3.31. 계류라인의 장력(FBVLP, 수평간격 : 10cm). .....	68
Fig. 3.32. 고유주기(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	69

Fig. 3.33. 반사율과 전달율(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	70
Fig. 3.34. 에너지감쇠율(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	71
Fig. 3.35. Swaying(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	71
Fig. 3.36. Heaving(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	72
Fig. 3.37. Rolling(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	72
Fig. 3.38. 표류거리(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	73
Fig. 3.39. 계류라인의 장력(FBVLP, 수평간격 : 15cm). .....	73
Fig. 3.40. 유속벡터의 공간분포(FBCPT, $H=4.0\text{cm}$ , $T=0.8\text{sec}$ ). .....	77
Fig. 3.41. 유속벡터의 공간분포(FBCPT, $H=4.0\text{cm}$ , $T=1.0\text{sec}$ ). .....	79
Fig. 3.42. 유속벡터의 공간분포(FBCPT, $H=4.0\text{cm}$ , $T=1.2\text{sec}$ ). .....	81
Fig. 3.43. 고유주기(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	83
Fig. 3.44. 반사율과 전달율(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	84
Fig. 3.45. 에너지감쇠율(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	85
Fig. 3.46. Swaying(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	86
Fig. 3.47. Heaving(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	86
Fig. 3.48. Rolling(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	87
Fig. 3.49. 표류거리(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	88

Fig. 3.50. 계류라인의 장력(FBCPT, 수평간격 : 5cm). .....	88
Fig. 3.51. 고유주기(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	89
Fig. 3.52. 반사율과 전달율(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	90
Fig. 3.53. 에너지감쇠율(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	91
Fig. 3.54. Swaying(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	92
Fig. 3.55. Heaving(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	92
Fig. 3.56. Rolling(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	93
Fig. 3.57. 표류거리(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	94
Fig. 3.58. 계류라인의 장력(FBCPT, 수평간격 : 10cm). .....	94
Fig. 3.59. 고유주기(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	95
Fig. 3.60. 반사율과 전달율(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	96
Fig. 3.61. 에너지감쇠(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	97
Fig. 3.62. Swaying(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	98
Fig. 3.63. Heaving(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	99
Fig. 3.64. Rolling(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	99
Fig. 3.65. 표류거리(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	100
Fig. 3.66. 계류라인의 장력(FBCPT, 수평간격 : 15cm). .....	100

Fig. 3.67. 각 형식의 부소파제에 대한 전달율의 비교. ....	102
Fig. 4.1. 모델항만과 좌표계. ....	104
Fig. 4.2. 투과성구조물에 의한 파랑변형의 검증을 위한 모델. ....	108
Fig. 4.3. 파고분포( $C_r=0.4$ , $C_t=0.3$ ; 日本土木學會 海岸工學委員會, 1993). ...	109
Fig. 4.4. 파고분포( $C_r=0.4$ , $C_t=0.3$ ; 광 등, 2003). ....	109
Fig. 4.5. 파고분포( $C_r=0.4$ , $C_t=0.3$ ; 이 연구). ....	110
Fig. 4.6. 파고분포의 산정결과( $C_r=0.4$ , $C_t=0$ ). ....	111
Fig. 4.7. 파고분포의 산정결과( $C_r=0.4$ , $C_t=0.4$ ). ....	112
Fig. 4.8. 현지모델항만과 좌표계. ....	113
Fig. 4.9. 수치해석에 적용된 각 부소파제. ....	114
Fig. 4.10. 각 부소파제 의한 파고분포. ( $H_{1/3}=1.0\text{m}$ , $T_{1/3}=3.5\text{sec}$ , $S_{\text{max}}=999$ ). ....	119
Fig. 4.11. 각 부소파제 의한 파고분포 ( $H_{1/3}=1.0\text{m}$ , $T_{1/3}=3.5\text{sec}$ , $S_{\text{max}}=10$ ). ....	122
Fig. 4.12. 각 부소파제 의한 파고분포 ( $H_{1/3}=1.0\text{m}$ , $T_{1/3}=5.5\text{sec}$ , $S_{\text{max}}=999$ ). ....	125
Fig. 4.13. 각 부소파제 의한 파고분포 ( $H_{1/3}=1.0\text{m}$ , $T_{1/3}=5.5\text{sec}$ , $S_{\text{max}}=10$ ). ....	128

Fig. 5.1. 수치해석 모델과 유체영역. ....	130
Fig. 5.2. 각 유체영역의 경계상에서의 좌표계. ....	137
Fig. 5.3. 자유부체의 무차원운동량. ....	163
Fig. 5.4. 긴장계류된 부소파제의 무차원운동량. ....	164
Fig. 5.5. 계류라인의 조건. ....	165
Fig. 5.6. 흘수의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제) ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $b/a=0.3$ , $c/a=0.167$ , $\theta=90^\circ$ , $\sigma^2 h/g=2.417$ ). ...	171
Fig. 5.7. 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제) ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $b/a=0.3$ , $c/a=0.167$ , $q=0.35$ , $\sigma^2 h/g=2.417$ ). ...	173
Fig. 5.8. 주기의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제) ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $b/a=0.3$ , $c/a=0.167$ , $q=0.35$ , $\theta=90^\circ$ ). ....	175
Fig. 5.9. 폭의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제) ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $c/a=0.167$ , $q=0.35$ , $\theta=90^\circ$ , $\sigma^2 h/g=2.417$ ). ....	177
Fig. 5.10. 흘수의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제). ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $b/a=0.3$ , $c/a=0.167$ , $\theta=90^\circ$ , $\sigma^2 h/g=2.417$ ). ...	182
Fig. 5.11. 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제). ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $b/a=0.3$ , $c/a=0.167$ , $q=0.35$ , $\sigma^2 h/g=2.417$ ). ...	184
Fig. 5.12. 주기의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제). ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $b/a=0.3$ , $c/a=0.167$ , $q=0.35$ , $\theta=90^\circ$ ). ....	186
Fig. 5.13. 폭의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제). ( $h=60\text{cm}$ , $a/h=2.0$ , $c/a=0.167$ , $q=0.35$ , $\theta=90^\circ$ , $\sigma^2 h/g=1.678$ ). ....	188



Fig. 5.14. 1基 Catenary계류 부소파제의 무차원운동량. ( $h = 60\text{cm}$ , $a/h = 2.0$ , $b/a = 0.3$ , $\theta = 90^\circ$ ). .....	190
Fig. 5.15. 2基 Catenary계류 부소파제의 무차원운동량. ( $h = 60\text{cm}$ , $q = 0.35$ , $a/h = 2.0$ , $b/a = 0.3$ , $c/a = 0.167$ ). ...	192
Fig. 6.1. 해석모델과 좌표계. ....	194
Fig. 6.2. 폰툰형 부소파제의 운동변위에 대한 3차원수리모형실험과 수치해석의 비교. ....	203
Fig. 6.3. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 90^\circ$ ). ....	208
Fig. 6.4. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 75^\circ$ ). ....	211
Fig. 6.5. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 60^\circ$ ). ....	214
Fig. 6.6. 입사파향각의 변화에 따른 무차원운동량의 산정결과. ....	216

# 1. 서론

---

## 1.1 연구의 배경과 목적

최근, 육상에서 가용공간의 부족과 자원고갈의 대안으로 해양·해안이 갖는 무한한 공간과 방대한 자원의 이용이 점차 강조되고, 그의 근간을 이루는 해양인프라의 구축과 연안역의 보호를 위한 방책으로 다양한 형태의 해양·해안·항만구조물이 연구·개발·계획·시공되어 왔다. 특히, 이러한 구조물 중에 방파제는 배후의 해역공간을 이용가능하게 하면서 고파랑, 태풍해일 및 해안침식 등과 같은 연안재해를 방지하는 연안역의 대표적인 구조물로 평가되어 오고 있다.

방파제의 기원은 기원전 200년까지 거슬러 올라가지만 본격적으로 건설되기 시작한 것은 유럽의 산업혁명 직후인 18세기 말과 19세기 초인 것으로 보고되고 있다(Ito, 1969). 초기의 방파제는 거의 사석방파제와 같은 중력식 구조물이 대부분이었고, 그 후 여러 가지 케이스 형태를 적용한 직립방파제와 파력과 반사파를 저감시키기 위하여 TTP로 대표되는 이형블록 혹은 사석으로 피복하는 형태의 방파제가 등장하기 시작하였다. 이와 같은 구조물은 혼성제, 소파블록피복제 및 경사제로 대표되며, 대부분이 해저에 고정되어 해수면상으로 건설되는 중력식 구조물이다(Takahashi, 1996).

이상에서 언급한 대형의 중력식 구조물은 고파랑에 대한 주요 항만의 항내 정온도를 유지시키기 위하여 막대한 예산으로 건설되어 왔지만, 특히 소규모 어항의 경우에는 매우 적은 예산으로 조잡한 사석경사제 정도가 오래 전부터 건설되었고, 건설시에도 충분한 사전 검토없이 무계획적으로 시공되었기 때문에 항내 흐름의 차단으로 인하여 어항내의 수질이 악화되기 시작하였다. 더불어, 어항 인근지역에서 생활오수의 항내유입, 어항의 수역내 혹은 주변에서 수산물의 처리, 생산, 가공 및 판매 등과 같은 수산업관련 제활동에 의한 폐·오수의 항내유입과 폐어구의 수중방치 등으로 어항내 및 인근해역의 수질악화는 심각한 수준에 달하고 있다. 또한, 좁은 어장내에서 양식어업권의 증가로 국내 양식어장은 고밀도 사육으로 됴과 동시에, 사료의 유실량 및 생사료로 인하여 연안어장환경이 나빠지는 악화의 일로상에 있다(해양수산부, 2002).

이에 기존의 중력식 방파제의 건설로 인하여 악화된 항내수질문제를 개선·유지할 수 있고, 친수성과 환경성 및 경제성을 갖춘 신형식의 다기능 구조물에 대한 필요성이 크게 요구되면서 주목을 받기 시작한 구조물 중에 하나로 부유식 구조물(부소파제; Floating Breakwater)을 들 수 있다. 중력식 구조물에 비해 부유식 구조물은 지진

의 피해가 적고, 시공성이 우수하며, 연약지반상에서 지반의 개량없이 시공될 수 있고, 조위차가 큰 해역에도 항상 동일한 천단고를 유지하여 선박의 계류 등에도 유리하며, 구조물 하부의 유수부를 통한 해수교환이 양호하여 해수교환 불량에 따른 항내의 오염을 최소화할 수 있으며, 무엇보다 경제적인 구조물로 알려져 있다.

이에 따라 일본과 같은 경우에는 수산양식활동의 원활한 수행 및 양식시설의 보호, 항내에서의 안전한 선박의 계류, 보다 깊은 해역으로 양식장의 조성 혹은 어장의 확장 등의 목적으로 어항내 또는 어장주변에 그 시공예를 많이 볼 수 있고, 국내에서도 마산시 원전어항에 부소파제를 처음으로 도입·시공(마산지방해양수산청, 2002; 포스코건설, 2003) 중에 있고, 통영시 바다목장의 전면해역 등을 비롯하여 많은 곳에서 계획되고 있다.

이상에서 언급한 부소파제로는 일반적으로 제작이 용이하고, 내파안정성이 뛰어난 폰툰형이 널리 이용되어 왔다. 그러나, 폰툰형 부소파제는 내습파를 외해로 반사시킴으로써 전달파를 저감하기 때문에 충분한 크기의 자중이 요구되고, 부소파제 폭의 3배 정도 이하의 비교적 단파장의 파랑에 대해서만 유효한 것으로 알려져 있다(沿岸開發技術研究センター, 1994). 일찍이 일본은 1951년 廣島縣 音戸港에 폰툰형의 RC제 부소파제를 처음으로 설치한 이후 부소파제의 단점인 장주기파랑의 제어를 개선하기 위하여 다양한 재료 또는 형상의 부소파제들을 개발하여 왔으며, 각종 형상의 부소파제를 100여곳 이상의 실효역에 설치하여 왔다. 특히, 일본의 조선사 및 중공업사들은 1970년대에 들어와서 자사의 독특한 부소파제를 적극적으로 개발하여 완전한 상용화 단계를 지나, 대형 부소파제의 제작을 위한 해상접합기술력까지 확보하고 있는 단계에 있다. 이에 발맞추어, 국내에서는 원전어항에 폰툰형 부소파제의 단점인 고반사성 및 장주기파에 대한 고투과성을 효과적으로 제어할 수 있고, 외류 등에 의한 파랑에너지의 소산을 도모하는 커튼식 부소파제(마산지방해양수산청, 2002 ; 포스코건설, 2003 ; 中村 등, 1999)를 채용하였다.

이 연구에서는 원전어항에서 채용하고 있는 부소파제(원전 부소파제)와 치수는 다르지만 같은 형상인 본체 하부의 연직판과 본체 전후에 연직판이 부착된 부소파제(연직판각형 부소파제)와 이 연구에서 처음으로 제안하는 본체 하부의 연직판을 전후 연직판의 하부에 수평으로 부착한 부소파제(복합판형 부소파제)를 상정하여, 이에 대한 수치해석과 수리모형실험으로 파랑변형과 동적거동을 해석함과 동시에, 그의 특성들을 비교·검토하였다. 이로부터 원전 부소파제에 비해 소요재료량의 차이가 크지 않으면서도 원전 부소파제 및 연직판각형 부소파제 보다 단주기 및 장주기파랑을 효율적으로 제어할 수 있는 복합판형 부소파제를 개발하게 되었다. 그리고, 평면2차원 파동장의 수치해석법인 연직선 Green함수에 기초한 특이점분포법을 적용하여 실효역에 설치된 복합판형 부소파제, 원전 부소파제 및 연직판각형 부소파제에 의한 항내정

온도를 계산하고, 그 결과를 비교·검토하여 복합판형 부소파제의 평면파랑제어기능의 탁월성을 또한 확인할 수 있었다.

이상의 기법들은 부소파제의 3차원적인 파랑변형과 동적거동이 해석되지 않는 수치계산법으로, 부소파제가 설치되는 실해역에서 변동수심과 해안경계를 고려한 多基의 부소파제에 의한 3차원적인 파랑변형 및 동적응답을 동시에 예측할 수 있는 해석법이 요구되지만 현 단계에서 컴퓨터 용량상 많은 어려움이 있는 실정이다. 따라서, 이 연구에서는 육역경계가 없는 일정수심의 3차원 파동장에 폰툰형 2基의 부소파제가 돌핀계류 및 Catenary계류된 경우에 있어서 파랑변형과 동적거동을 고유함수전개법과 경계요소법을 병용한 3차원수치해석으로 입사파랑의 조건과 홀수 등의 변화에 따른 간섭효과와 배치문제를 고찰하였다. 그러나, 3차원해석에서 고유함수전개법과 경계요소법을 병용한 해석법은 폰툰형의 부소파제에는 유용한 기법이지만 전술한 연직판각형 부소파제, 원전 부소파제 및 복합판형 부소파제 등의 경우에는 비효율적인 기법이다. 따라서, 복잡한 형상의 구조물에도 적용 가능한 3차원특이점분포법을 적용한 3차원해석으로부터 이 연구에서 연구·개발하는 복합판형 부소파제에 의한 파랑변형 및 동적거동의 특성을, 입사파랑조건의 변화에 따라 명확히 검토하였다.

## 1.2 연구의 구성

이 연구는 총 7장으로 구성되며, 제 1장에서는 이 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 이 연구의 구성에 대해서 간단히 기술한다. 제 2장에서는 부소파제의 많은 건설사례를 갖는 일본의 현지조사 및 문헌조사를 통하여 부소파제의 설치수심, 단면형상, 구조형상 및 파랑제어능력 등을 조사하였다. 제 3장에서는 2차원의 고유함수전개법과 특이점분포법을 적용하여 폰툰형부소파제에 대한 수치해석결과와 수리모형실험의 결과를 비교·검토하였으며, 복잡한 형상의 원전 부소파제, 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제에도 적용이 가능한 2차원의 특이점분포법으로 파랑제어기능과 동적거동 등을 충분히 비교·검토하여 복합판형 부소파제를 새로이 연구·개발할 수 있었다. 제 4장에서는 연직선 Green함수에 기초한 특이점분포법의 이론적 배경을 기술하고, 원전 부소파제, 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제를 대상으로 평면파랑변형에 대한 수치해석을 실시하였다. 제 5장에서는 폰툰형 2基의 부소파제에 의한 3차원파랑변형과 동적거동을 해석하기 위한 수치해석법의 기본이론을 살펴보고, 돌핀 및 Catenary계류된 2基의 부소파제에 대해 홀수, 입사파향각, 입사주기 및 폭 등을 변화시켜 3차원파랑변형과 각 운동특성을 검토하였다. 그리고, 제 6장에서는 복합판형 부소파제에 의한 3차원파랑변형과 동적거동을 해석하기 위하여 적용된 3차원Green함수에 기초한 특이점분포법의 기본적인 이론을 서술하고, 3차원파

량변형 및 6자 운동 특성을 3차원해석으로부터 검토하였다. 제 7장에서는 이상의 검토로부터 얻어진 중요한 사항을 요약한 이 연구의 결론을 기술하였다.

## 2. 부소파제의 설치사례

이 장에서는 부소파제의 설치사례로 가장 많은 예를 가지고 있는 일본의 현지를 답사하고, 더불어 문헌 등을 통하여 얻은 자료를 토대로 부소파제의 설치사례와 구조 형식별 부소파제의 특징 등을 기술한다.

### 2.1 부소파제 설치사례

일본은 1951년 廣島縣 音戸港에 꺾은형 RC제 부소파제를 최초로 설치한 이래로 다양한 재료 및 형태의 부소파제를 개발하여, 현재 전국 21개의 지자체에서 100여 개소에 설치하고 있다. 특히, 일본의 조선사 및 중공업사들은 1970년대에 자사의 독특한 부소파제 모델의 개발을 적극적으로 추진하여, 1990년대 이후에는 어항 및 어장에 있어서는 완전한 상용화 단계에 이르렀고, 현재에는 설계기술, 제작기술 및 해상접합 기술까지 모든 면에서 세계최고의 기술을 확보하고 있다고 할 수 있다.

일본의 부소파제는 수산양식활동의 원활한 수행, 양식시설의 보호, 항내에서의 안전한 선박계류 및 보다 깊은 해역으로 양식장의 조성 혹은 어장의 확장 등의 목적으로 어항내 혹은 어장주변에 대부분 설치되어 있다.

일본의 부소파제의 제작소, 관련 연구소와 대학 및 일본에 설치되어 있는 부소파제의 현장을 일부 답사하고, 부소파제의 제원 및 구조형식 등을 조사한 결과를 다음의 Table 2.1~2.6에 나타낸다.

Table 2.1. 廣島縣에 설치된 부소파제.

장 소	총연장(m)	基當의 길이(m)	基數	구조형식
箱崎漁港	103	47	2	PCH
鞆之浦漁港	275	70, 60	2	PCH
廣島港宇品地區	60	60	1	PCH

Table 2.2. 長崎縣에 설치된 부소파제.

장 소	총연장(m)	基當의 길이(m)	基數	구조형식
網場湾	200	57	3	내부수류진동형
相浦地區	169	80	2	PCH
俵か浦地區	220	50	4	PCH

Table 2.3. 大分縣에 설치된 부소파제.

장 소	총연장(m)	基當의 길이(m)	基數	구조형식
淺海井漁港	105	50	2	PCH
羽出漁港	60	55	1	PCH
保戸島地區	150	60	2	PCH
鶴見地區	430	64	6	PCH

Table 2.4. 三重縣에 설치된 부소파제.

장 소	총연장(m)	基當의 길이(m)	基數	구조형식
安乘漁港	160	48	3	PCH
三木浦漁港	70	65	1	PCH

Table 2.5. 愛媛縣에 설치된 부소파제.

장 소	총연장(m)	基當의 길이(m)	基數	구조형식
岩松地區	494			FRP
	455	45	9	삼중연직벽형
嘉島漁港	51	21	2	RC
	21	21	1	공기제어식
國永漁港	60	21	2	RC
鼠鳴漁港	53	21	2	RC
尻貝漁港	104	21	4	RC
下波地區	240	57	4	RC
	153	75	2	PCH
須下漁港	104	21	5	RC
戸島地區	372	57	6	동요제어식
魚泊漁港	287	21	11	RC
	71	30	2	PCH
結出漁港	25	20	1	RC
	90	40	2	PCH
田之浦地區	400	60	9	동요제어식

Table. 2.6 熊本縣에 설치된 부소파제.

장 소	총연장(m)	基當의 길이(m)	基數	구조형식
深海地區	200			FRP
牧本地區	232	40	5	경사식
牛深地區	360	54	6	동요제어식
横浦地區	180	40	4	경사식
			1	삼중연직벽형
嵐口地區	185	30	6	동요제어식

## 2.2 구조형식별 부소파제의 특징 및 설치사례

일반적인 부소파제의 형식인 직사각형의 폰툰형 부소파제는 장주기파랑의 제어에는 한계가 있다. 따라서, 보다 장주기파랑의 제어를 위해 부소파제의 구조형식에 변화를 준 여러 형식의 부소파제가 연구·개발되어 왔으며, 이하에서는 구조형식에 따른 부소파제의 파랑제어방식을 기술하고, 설치사례를 정리하여 Table 2.7~2.13에 기술하였다.

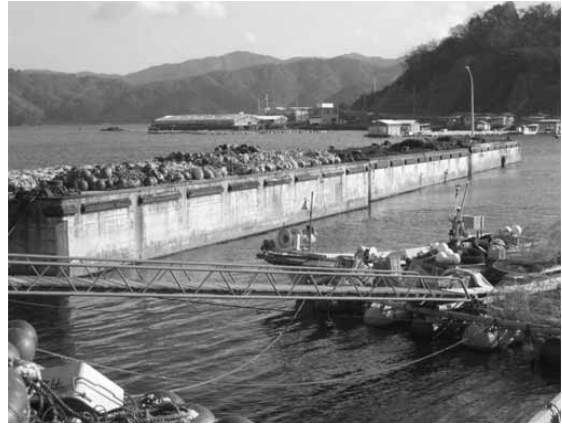
### 2.2.1 폰툰형 부소파제

폰툰형 부소파제는 직사각형의 형상을 가지며, 전면의 연직벽에 의한 입사파의 반사파 및 전달파와 부체의 운동에 의해 발생하는 발산파의 위상차를 이용하여 배후역의 정온화를 도모하는 방식이며, 모든 부소파제는 기본적으로 이 방식을 일부 채용하고 있다. 대표적인 폰툰형 부소파제는 오래 전부터 사용되어 온 RC제 부소파제(Photo 2.1), 三井造船이 개발한 PCH제 부소파제(Photo 2.2)를 들 수 있다.





(a) 愛媛縣 尻貝漁港.



(b) 愛媛縣 魚泊漁港.

Photo 2.1. RC제 부소파제의 설치사례.



(a) 廣島縣 廣島港 宇品地區.



(b) 大分縣 鶴見地區.

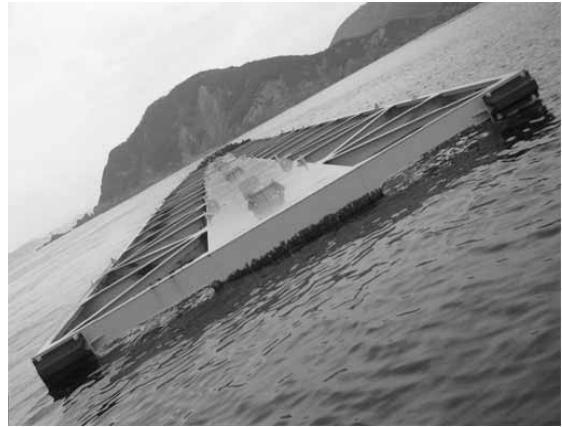
Photo. 2.2 PCH제 부소파제의 설치사례.

## 2.2.2 삼중연직벽형 부소파제

IHI가 개발한 삼중연직벽형 부소파제(Photo 2.3)는 직사각형단면의 부력체를 중앙에 두고, 그 전후에 연직벽을 배치하여 보로 연결한 단순한 형상의 구조를 가진다. 외양성의 장주기파랑에 대응하기 위해서 연직벽은 비교적 깊은 흘수를 가지고 있으며, 그 하부에는 동요를 억제시키기 위하여 안정장치(Stabilizer)를 구비하고 있다. 이와 같은 독특한 구조를 채용하고 있으므로 삼중연직벽형 부소파제는 복원력이 작고, 고유주기가 길며, 전후연직벽의 저부에 설치된 안정장치에 의한 회전운동의 감쇠효과가 크다. 따라서, 통상의 폰툰형 부소파제의 운동에서 볼 수 있는 공진현상이 없는 장점이 있다.



(a) 熊本縣 横浦地區.



(b) 愛媛縣 岩松地區.

Photo. 2.3 삼중연직벽형 부소파제의 설치사례.

### 2.2.3 경사형 부소파제

東京製網이 개발한 경사형 부소파제(Photo 2.4)는 수중의 경사수평판을 이용하여 상부로 통과하는 파랑을 강제쇄파시켜 배후역의 정온화를 유도하는 방식을 채용하고 있다. 그리고, 동요를 제어하기 위하여 하부에 안정판을 부착하였다. 이러한 경사형 부소파제는 반사파가 작기 때문에 계류력도 작고, 안정성이 뛰어나며, 부체부의 흡수면적을 크게 취하고 있기 때문에 흡수의 변화가 작으며, 소파효과가 변하지 않는 장점이 있다.



(a) 熊本縣 牧本地區.



(b) 山口縣 大島漁港.

Photo. 2.4 경사식 부소파제의 설치사례.

## 2.2.4 공기제어식 부소파제

日立造船이 개발한 공기제어식 부소파제(Photo 2.5)의 구조는 파의 방향으로 바닥이 없는 3개의 유수실로 구성되어 있으며, 중앙의 유수실은 상부에 공기구멍이 있고, 좌우의 유수실은 관로에 의해 연결되어 있다. 이러한 유수실내에서 피스톤모드의 파랑 공진에 따라 공기의 흐름이 발생할 때에 공기구멍 및 관로는 공기의 흐름을 제한하는 것으로 된다. 이러한 공기제어식 부소파제의 특징은 부력체의 대부분이 수면하에 있고, 복원력이 작아 고유주기가 길기 때문에 잘 동요되지 않으며, 부력체의 위치에 의해 소파효과가 파장이 짧은 범위에서 긴 범위로 변화되므로, 이를 이용하여 대상해역에서 최다빈도의 파에 대해 최고의 효과를 달성할 수 있다. 그리고, 파랑에너지를 전환시켜 공기터빈을 가동하면 발전이 가능하게 된다.



(a) 愛媛縣 嘉島漁港.

Photo 2.5. 공기제어식 부소파제의 설치사례.

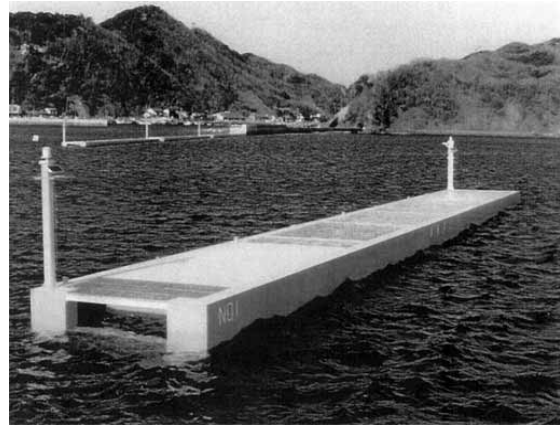
## 2.2.5 동요제어식 부소파제

三菱重工業이 개발한 동요제어식 부소파제(Photo 2.6)의 소파원리는 이상적인 소파 조건을 얻기 위하여 Ballast인 물의 운동으로부터 부소파제의 상하운동과 좌우운동에 대한 위상차를 변화시켜 양자를 일치시키려고 하는 것에 있다. 여기서, 동요제어탱크는 선박에 구비되어 있는 Anti-pitching tank나 Anti-rolling tank와 동일한 형식이지만, 선박의 경우에는 동요진폭을 감소시키기 위해 설치되어 있는 점에 반해, 부소파제의 경우는 동요의 위상을 변화시키는 데에 그 목적이 있다. 이러한 동요제어식 부소파제는 파장이 짧은 범위에서는 부체폭에 대한 흡수의 비가 큰 방파제가, 파장이 긴 범위에서는 그 반대의 경우가 좋은 파랑제어성능을 나타내므로, 단파장형 및 장파장형의

2종류를 사용할 수 있으며, 소파효과가 뛰어난 장점이 있다.



(a) 熊本縣 牛深地區.



(b) 長崎縣 水崎漁港.

Photo. 2.6 동요제어식 부소파제의 설치사례.

## 2.2.6 내부수류진동형 부소파제

관민교류공동연구로부터 개발된 내부수류진동형 부소파제(Photo 2.7)는 내부에 격벽을 설치함으로써 격벽을 따른 내부수의 교란과 외의 형성에 의해 파랑을 제어하며, 내부의 격벽에서 상하운동모드와 좌우운동모드의 水流의 운동으로, 水柱의 길이가 길게 되고, 水流의 공진주기가 길어져 장주기파랑의 소파에 기능을 발휘하는 메커니즘으로 되어 있다.



(a) 長崎縣 網場灣.

Photo 2.7. 내부수류진동형 부소파제의 설치사례.

### 2.2.7 FRP제 부소파제

Bridgestone이 개발한 FRP제 부소파제(Photo 2.8)는 수리모형실험으로부터 소파성능을 규명하였고, 제조의 용이성, 시공의 용이성에 대한 검토와 더불어 적절한 형상을 도출하고 있다. 계류시스템에서는 합성유지의 로프를 사용하고 있으며, 부식되지 않는 특징이 있다.



(a) 熊本縣 深海地區.



(b) 愛媛縣 岩松地區.

Photo. 2.8 FRP제 부소파제의 설치사례.

Table 2.7. RC제 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	어항명	사업년도	설치조건			
			수심 (m)	설계파고 (m)	연장(m) [基當길이(m)× 基數]	1基의 길이(m)× 폭 (m)× 높이(m)
廣島	音戸	1951-1978	5~14	1.5	253[40×3]	21×7×45
山口	通	1959-1961	10~13	1.8	72[21×3]	21×7×45
愛媛	九島	1967-1976	5~20	1.0	300[21×12]	21×7×45
愛媛	魚泊	1979-1982	5~30	1.2	287[21×12]	21×7×45
		1986	20~30	1.4	45[41×1]	40×10×35
愛媛	神崎	1973-1974	10~20	1.0	30[21×1]	21×7×45
愛媛	平浦	1970-1974	5~20	1.0	48[21×2]	21×7×45
愛媛	蔣淵	1974-1979	5~21	1.0	48[21×2]	21×7×45
愛媛	奥浦	1970	15~20	1.3	49[21×2]	21×7×45
愛媛	大良	1971	11~20	1.5	26[21×1]	21×7×45
愛媛	尻貝	1962-1984	7~30	0.9	104[21×4]	21×7×45
愛媛	國永	1973-1980	7~19	1.0	60[21×2]	21×7×45
愛媛	鼠鳴	1973-1974	8~13	1.0	53[21×1]	21×7×45
愛媛	須下	1967-1974	7~32	1.3	146[21×5]	21×7×45
愛媛	喜路	1984-1985	15~30	1.8	90[40×2]	40×13×35
愛媛	結出	1985-1986	10~20	1.2	25[20×1]	20×7×38
愛媛	嘉島	1983-1984	10~20	2.0	51[21×2]	21×7×45
愛媛	豊島	1983-1984	12~18	1.7	40[40×1]	40×10×35

Table 2.8(a) PCH제 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	체 제			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
廣島	浜之浦漁港	1982~1985	15	275	4	70×10.0×3.0:2.7]	1.3	3.6	2.8	5.6	0.25
山口	室津港	1982~1984	18	105	3	60×10.0×3.0:2.7]	1.13	3.35	2.1	3.35	0.25
三重	方座浦魚港	1978~1980	20	79	2	40×10.0×2.1	1.1	4.0	2.7	4.0	0.5
大分	羽出浦魚港	1982~1985	25	32	1	25×10.0×3.0	1.0	4.2	7.0	6.6	0.4
三重	三木浦魚港	1986	15	70	1	65×10.0×3.0	0.8	2.6	1.5	2.6	0.2
島根	浦郷魚港	1986~1989	23	375	7	50×9.0×2.7	1.2	3.6	2.3	3.6	0.4
廣島	阿多田魚港	1987	18.5	49	1	45×8.0×2.4	1.0	3.1	2.6	3.9	0.4
廣島	廣島港(宇品)	1988	10	60	1	60×8.0×2.4	0.92	3.3	2.5	3.3	0.25
福岡	相島漁港	1988~1996	24.5	410	7	50×10.5×3.35	2.6	4.7	4.9	4.7	0.4
大分	大入島魚港	1988	19	29	1	25×8.0×2.4	2.1	4.2	3.9	4.2	0.4
愛媛	篠塚漁港	1988~1992	15	160	2	75×15.0×4.7	2.7	5.4	5.0	5.4	0.4
宮城	出島魚港	1989~1991	20	162	3	50×7.0×2.1	1.0	3.0	1.9	3.0	0.4
廣島	箱崎魚港	1989~1990	30	103	2	47×5.0×2.8	0.54	1.98	1.5	2.57	0.3
大分	淺海井 廣島港	1990~1991	17	105	2	50×5.0×2.8	0.8	2.6	1.5	2.6	0.4
徳島	小松島港	1990	5	50	1	50×5.0×2.6	1.0	3.0	1.9	3.0	0.35

Table 2.8(b) PCH제 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
島根	浦郷魚港	1990~1991	20	110	2	50×9.0×2.7	1.2	3.6	2.3	3.6	0.4
愛媛	結出魚港	1990~1991	30	90	2	40×8.0×2.4	0.75	4.6	2.0	5.2	0.4
愛媛	西町魚港	1992	20	39	1	35×8.0×2.4	0.83	3.6	2.79	12.0	0.4
大分	護江魚港	1992~1995	5~12	48	2	20×8.0×2.4	0.78	5.4	2.5	5.7	0.67
三重	方座浦魚港 (東地區)	1992	18	45	1	40×10.0×2.1	1.1	2.1	2.7	4.0	0.5
岡山	石島港	1990~1992	6~19	50	1	50×8.0×2.4	1.22	3.5	2.2	3.5	0.25
大分	保戸島魚港	1992~1993	35~50	180	2	85×12.0×4.0	1.8	4.9	7.07	6.6	0.4
愛媛	魚泊魚港	1993~1994	10~35	71	2	30×8.0×2	1.36	3.39	2.53	3.30	0.3
三重	三木浦魚港	1993	20	70	1	60×8.0×2.6	0.8	2.2	1.5	2.2	0.2
愛媛	田之浦	1994	5~40	400	9	40×6.0×3.5	0.8	3.38	4.87	5.55	0.4
廣島	豊島魚港	1994	15~20	28	1	28×5.0×2.8	1.0	2.8	1.86	2.8	0.3
愛媛	下波蔭淵	1994~1996	65	521	2	75×16.0×4.8	1.6	6.0	10.4	12.0	0.5
佐賀	名護屋魚港	1995	17	52	1	50×4.0×2.2	0.8	2.2	1.49	2.2	0.28
愛媛	玉津魚港	1995	5~30	15	1	15×10.5×3.15	1.82	5.3	5.2	6.28	0.5



Table 2.8(c) PCH제 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
大分	鶴見大島	1995~1997	65	430	6	64×10.0×3.0	1.8	4.7	7.2	6.2	0.4
三重	安乗漁港	1996~1998	10	160	3	48×9.0×2.3	1.1	2.8	5.4	8.10	0.2
兵庫	坊勢漁港	1997	12~44	50	1	43×11.5×3.45	1.6	4.6	4.65	5.2	0.4
岡山	宇野港	1996	28	45	1	45×4.0×2.0	0.67	2.67	1.21	2.67	0.75
長崎	相浦	1998	10~15	169	2	80×8.0×2.4	0.65	4.0	1.6	13.7	0.3
大分	保戸島漁港	1999	18~82	150	2	60×17.5×5.2	3.6	6.2	6.7	6.2	0.5
兵庫	坊勢漁港	1999	7~20	50	2	70×16×4.8	1.8	4.8	3.35	4.9	0.3
長崎	高島漁港	2000	20	60	1	60×8.0×3.1	1.6	3.6	7.44	15.4	0.2
大分	羽出魚港	2000	6~29	60	1	55×5.0×2.9	0.38	1.7	4.84	5.3	0.4
愛媛	水荷浦漁港	1999~2000	20~40	92	2	40×8.0×2.4	1.3	3.53	2.42	3.53	1.3
三重	方座浦魚港	2000	21	46	1	40×6.0×1.9	0.8	2.3	1.86	15.1	0.2
長崎	俵ヶ浦	2000~2001	20~32	220	4	50×5.5×3.4	0.6	3.5	3.3	3.72	0.5
兵庫	家島町 坊勢 漁港	2001~2002	135~20	50	1	44×11×3.2	1.1	5.2	2.0	5.2	0.6
廣島	沖浦魚港	2002	10~20	30	1	30×9.0×2.7	1.32	3.3	2.55	3.21	0.2

Table 2.9. 삼중연직벽형 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
愛媛	岩松	1978~1982	12~18	455	9	45×12×72	2.0	3.6	2.8	5.6	0.25
宮崎	南浦	1982~1988	17~20	265	7	25×15×9.6 : 47 40×15×9.6 : 37	2.0	3.35	2.1	3.35	0.25
佐賀	京泊漁港	1988~1991	13~25	145	3	45×5.5×2.15	1.0	4.0	2.7	4.0	0.5

Table 2.10. 경사식 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
熊本	牧本	1979~1981	15~30	232	5	40×9.5×6.5	2.0	3.6	2.8	5.6	0.25
熊本	横浦	1983~1986	30~40	180	4	40×10.0×6.6	2.0	3.35	2.1	3.35	0.25
静岡	沼津	1986~1987	20~40	108	2	50×8.5×5.8	2.2	4.0	2.7	4.0	0.5
山口	大島漁港	1986~1991	16~26	230	4	50×9.0×7.0	2.1	4.2	7.0	6.6	0.4

Table 2.11. 공기제어식 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
愛媛	嘉島魚港	1986	20~28	21	1	21×6.12×2.35	1.4	3.8	2.0	4.3	0.3

Table 2.12. 동요제어식 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
熊本	嵐口	1978~1980	20~25	185	6	30×7×2.7	1.8	3.6	2.8	5.6	0.25
大阪市	天保山	1981	10	62	2	30×5×2.3	1.0	3.35	2.1	3.35	0.25
熊本	牛深	1983~1987	21~32	360	6	54×13.5×5.25	3.15	4.0	2.7	4.0	0.5
長崎	靑島漁港	1984~1985	20~37	128	3	40×6.0×2.6	1.42	4.2	7.0	6.6	0.4
愛媛	戸島	1986	30~70	371.5	6	57×8.4×3.25	1.3	5.0	4.0	7.2	0.62
							1.4	4.9	8.0	10.2	0.57
長崎	水崎魚港	1986~1987	20~40	141	3	45×4.2×2.0	1.4	3.3	2.8	3.3	0.4
長崎	水崎	1988~1989	10~50	93.5	2	45×5.0×2.2	1.4	3.3	1.4	3.3	0.4
静岡	静岡浦	1988~1990	73'77	400	7	52×7.5×2.8	1.40 1.30	4.1 3.8	2.8	14.0	0.3

Table 2.13. 내부수류진동형 부소파제의 설치위치와 조건.

위치	지구	사업년도	수심(m)	제 체			소파대상파		구조설계파		전달율
				총연장(m)	기수	길이×폭×높이(m)	파고(m)	주기(sec)	파고(m)	주기(sec)	
長崎	網場	1993~1995	18~28	200	3	57.0×11.0×8.3	1.9	6.7	4.61	13.3	0.5

# 3. 부소파제의 2차원해석

## 3.1 이론적 배경

부소파제의 개발·설계에 있어서, 2차원적인 부소파제의 단면형상과 그의 운동변위 및 계류라인의 장력 등은 중요한 요소이며, 이는 단면2차원수치해석과 수리모형실험으로 산정될 수 있다. 특히, 부소파제의 효과적인 단면형상을 단면2차원수치해석으로부터 결정하는 것은 비용과 시간의 절감이라는 관점에서 매우 중요하며, 보다 효과적인 부소파제의 단면을 결정하기 위하여 단면2차원수치해석으로부터 여러 형식의 부소파제에 대한 파랑변형과 동적거동을 검토할 필요가 있다. 그리고, 검토된 효과적인 단면에 대한 수치해석의 결과를 검증하고, 또한 예측하지 못한 제요소를 파악하기 위하여 반드시 수리모형실험이 수행될 필요가 있다. 따라서, 이 장에서는 기본형인 폰툰형 부소파제에 대해 고유함수전개법(Eigenfunction Expansion Method ; EEM)과 특이점분포법(Source Distribution Method ; SDM)을 적용한 2차원수치해석법으로부터 그의 파랑제어기능과 동적거동을 검토하였으며, 수리모형실험을 통하여 수치해석법의 타당성을 검증하였다. 그리고, 원전어항에서 채용하고 있는 형식(원전 부소파제)인 본체하부의 연직판과 본체 전후에 연직판이 부착된 부소파제(연직판각형 부소파제)와 이 연구에서 새롭게 제안하는 본체 하부의 연직판을 전후연직판의 하부에 수평으로 부착한 부소파제(복합판형 부소파제)에 대한 수치해석과 수리모형실험을 통하여 파랑변형과 동적거동을 비교·검토하였다. 이로부터 원전 부소파제에 비해 소요재료량의 변화가 크지 않으며, 동시에 장주기파랑을 효과적으로 제어할 수 있는 복합판형 부소파제를 연구·개발할 수 있었다. 또한, 원전 부소파제와 동일한 형상을 갖는 연직판각형 부소파제를 원전 부소파제의 대안으로 채용할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

## 3.2 고유함수전개법

고유함수전개법은 직사각형의 불투과성 잠제(Submerged breakwater)나 트렌치(Trench) 등과 같이 유체영역을 수심의 변화에 따라 연직으로 분할할 수 있는 경우에 적용되며, 각각의 유체역에 있어서 유체운동의 속도포텐셜을 영역의 상면과 하면의 경계조건을 만족하도록 결정한다. 이 때, 속도포텐셜함수에 포함되는 미정계수는 유체영역 분할의 가상연직경계면에서 속도포텐셜(압력)과 그의 법선미분(유속)이 일치하는 조건(연속조건)과 고유함수의 직교성으로부터 얻어지는 미정계수의 1차관계식에 의해

결정되는 수치해석법이다.

### 3.2.1 지배방정식과 경계조건

Fig. 3.1에 나타내는 바와 같이 일정수심  $h$ 의 2차원파동장에 폰툰형 부소파제가 Catenary계류된 경우를 고려한다. 부소파제의 중심은  $G(0, z_G)$ 에 있고, 흘수를  $qh$ , 질량을  $M_g$ , 관성모멘트를  $I_m$ 으로 각각 정의한다. 이 때, 수심의 변화와 경계조건의 변화에 따라 유체영역을  $I, II, III$ 으로 분할하면 각 영역에서 속도포텐셜  $\Phi(x, z, t)$  및 부소파제의 운동요소  $x_0$ (Swaying),  $z_0$ (Heaving),  $\theta_0$ (Rolling)에 관한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

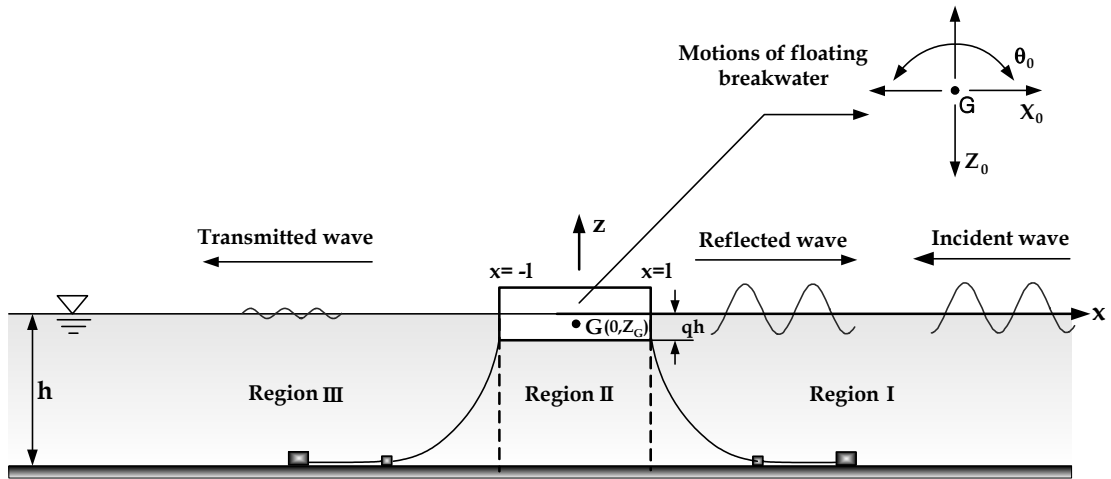


Fig. 3.1. 유체영역의 분할과 좌표계.

#### • 지배방정식

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0, \quad j = I, II, III \quad (3.1)$$

#### • 경계조건

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0, \quad z = 0, \quad j = I, III \quad \text{<combined free surface boundary condition>} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0, z = -h, j = I, II, III \quad \langle \text{impermeable boundary condition on sea bottom} \rangle \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} \{z_0 + \theta_0 x\}, z = -qh, j = II$$

$\langle \text{surface boundary condition on the floating breakwater} \rangle \quad (3.4)$

여기서,

$$\Phi_j(x, z, t) = \phi_j(x, z)e^{i\sigma t}, j = I, II, III \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} x_0 = \alpha e^{i\sigma t} \\ z_0 = \beta e^{i\sigma t} \\ \theta_0 = \omega e^{i\sigma t} \end{cases} \quad (3.6)$$

또한,  $\alpha, \beta, \omega$ 는 Swaying, Heaving 및 Rolling의 복소진폭,  $\sigma$ 는 각주파수( $= 2\pi/T$ ,  $T$ 는 주기),  $i = \sqrt{-1}$ ,  $g$ 는 중력가속도이다.

식(3.5), (3.6)의 결과를 식(3.1)~(3.4)에 대입하여 다음을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial z^2} = 0, j = I, II, III \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi_j = 0, z = 0, j = I, III \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0, z = -h, j = I, II, III \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = i\sigma \{\beta + \omega x\}, z = -qh, j = II \quad (3.10)$$

•  $x = \pm l$ 의 가상경계면에서 경계조건<수평유속과 압력의 접합조건>

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial x} = \begin{cases} i\sigma \{\alpha - (z - z_G)\omega\}, & x = +l, -qh < z < 0 \\ \frac{\partial \phi_{II}}{\partial x}, & x = +l, -h < z < -qh \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\phi_I = \phi_{II}, \quad x = +l, -h < z < -qh \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \phi_{III}}{\partial x} = \begin{cases} i\sigma \{\alpha - (z - z_G)\omega\}, & x = -l, -qh < z < 0 \\ \frac{\partial \phi_{II}}{\partial x}, & x = -l, -h < z < -qh \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\phi_{III} = \phi_{II}, \quad x = -l, -h < z < -qh \quad (3.14)$$

### 3.2.2 속도포텐셜의 유도

지배방정식(3.7)과 각 유체영역에서 주어지는 경계조건을 만족하는 속도포텐셜의 일반해를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\phi_I(x, z) = \begin{cases} \left\{ A_0 e^{ik(x-l)} + B_0 e^{-ik(x-l)} \right\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-k_n(x-l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\phi_{II}(x, z) = \begin{cases} C_0 x + D_0 \\ + \sum_{s=1}^{\infty} \left\{ C_s e^{\frac{s\pi}{qh}(x-l)} + D_s e^{-\frac{s\pi}{qh}(x+l)} \right\} \cos \frac{s\pi(z+h)}{\bar{q}h} \\ + \frac{i\sigma\beta}{\bar{q}h} \left\{ -\frac{x^2}{2} + \frac{(z+h)^2}{2} - \frac{\bar{q}^2 h^2}{6} \right\} \\ + \frac{i\sigma\omega x}{\bar{q}h} \left\{ -\frac{x^2}{6} + \frac{(z+h)^2}{2} - \frac{\bar{q}^2 h^2}{6} \right\} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\phi_{III}(x, z) = E_0 e^{ik(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n e^{k_n(x+l)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \quad (3.17)$$

여기서,  $B_0, B_n, E_0, E_n, C_0, D_0, C_s, D_s$ 는 속도포텐셜의 복소미정계수,  $\bar{q} = 1 - q$ , 식(3.16)에서 운동경계조건에 대한 특수해는 Laplace변환으로부터 유도된 결과이다. 그리고,  $k$ 와  $k_n$ 은 진행파와 감쇠정상파(Evanescent mode waves)의 파수로 복합자유수면경계조건을 만족하기 위하여 다음의 분산관계식에 의해 주어지는 고유치이다.

$$\frac{\sigma^2}{g} = k \tanh kh = -k_n \tan k_n h \quad (3.18)$$

또한,  $A_0$ 는 입사파성분을 나타내는 속도포텐셜의 복소계수로써 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$A_0 = \frac{igHe^{ikl}}{2\sigma} \quad (3.19)$$

여기서,  $H$ 는 입사파의 파고를 나타낸다.

### 3.2.3 속도포텐셜 미정계수의 결정

속도포텐셜의 미정계수는 분할된 유체영역의 경계면에서 에너지Flux와 질량Flux가 연속되어야 하기 때문에 식(3.11)~(3.14)의 접합조건을 만족하여야 한다. 이 접합조건에 식(3.15), (3.16), (3.17)을 대입하고, 식(3.11)±(3.13), 식(3.12)±(3.14)의 계산을 수행하면 다음의 식들을 얻는다.



$$\begin{aligned}
& ik(A_0 - B_0 + E_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} - \sum_{n=1}^{\infty} k_n (B_n - E_n) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\
& = \begin{cases} \cdot 2i\sigma \{\alpha - (z - z_G)\omega\}, & (-qh < z < 0) \\ \cdot \left\{ \begin{aligned} & 2C_0 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\pi}{\bar{q}h} (1 + e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})(C_s - D_s) c \frac{s\pi(z+h)}{\bar{q}h} \\ & + \frac{i\sigma\omega}{\bar{q}h} \left\{ -l^2 + (z+h)^2 - \frac{\bar{q}^2 h^2}{3} \right\}, \end{aligned} \right. & (-h < z < qh) \end{cases} \quad (3.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& ik(A_0 - B_0 - E_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} - \sum_{n=1}^{\infty} k_n (B_n + E_n) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\
& = \begin{cases} \cdot 0 & (-qh < z < 0) \\ \cdot \left\{ \begin{aligned} & \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\pi}{\bar{q}h} (1 - e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})(C_s + D_s) c \frac{s\pi(z+h)}{\bar{q}h} \\ & - \frac{2i\sigma\beta l}{\bar{q}h} \end{aligned} \right. & (-h < z < -qh) \end{cases} \quad (3.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (A_0 + B_0 + E_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n + E_n) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\
& = 2D_0 + \sum_{s=1}^{\infty} (1 + e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})(C_s + D_s) c \frac{s\pi(z+h)}{\bar{q}h} \\
& + \frac{i\sigma\beta}{\bar{q}h} \left\{ -l^2 + (z+h)^2 - \frac{\bar{q}^2 h^2}{3} \right\} \quad (-h < z < -qh) \quad (3.22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (A_0 + B_0 - E_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n - E_n) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\
& = 2lC_0 + \sum_{s=1}^{\infty} (1 - e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})(C_s - D_s) c \frac{s\pi(z+h)}{\bar{q}h} \\
& + \frac{i\sigma l\omega}{\bar{q}h} \left\{ -\frac{l^2}{3} + (z+h)^2 - \frac{\bar{q}^2 h^2}{3} \right\} \quad (-h < z < -qh)
\end{aligned} \tag{3.23}$$

식(3.20)~(3.23)에 고유함수의 직교성을 이용하여, 주어진 영역에 대해 연직적분을 실시하면 다음의 식들을 얻는다.

$$\begin{aligned}
ikf_1(A_0 - B_0 + E_0) &= 2f_4C_0 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\pi}{\bar{q}h} (1 + e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})f_5(C_s - D_s) \\
&+ 2i\sigma f_2\alpha + \frac{i\sigma\omega}{\bar{q}h} \left\{ -2\bar{q}hf_3 - \left( l^2 + \frac{\bar{q}^2 h^2}{3} \right) f_4 + f_6 \right\}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned}
-k_nf_{1n}(B_n - E_n) &= 2f_{4n}C_0 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\pi}{\bar{q}h} (1 + e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})f_{5n}(C_s - D_s) \\
&+ 2i\sigma f_{2n}\alpha + \frac{i\sigma\omega}{\bar{q}h} \left\{ -2\bar{q}hf_{3n} - \left( l^2 + \frac{\bar{q}^2 h^2}{3} \right) f_{4n} + f_{6n} \right\} \\
n &= 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$ikf_1(A_0 - B_0 - E_0) = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\pi}{\bar{q}h} (1 - e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})f_5(C_s + D_s) - \frac{2i\sigma l f_4}{\bar{q}h} \beta \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
-k_nf_{1n}(B_n + E_n) &= \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\pi}{\bar{q}h} (1 - e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})f_{5n}(C_s + D_s) - \frac{2i\sigma l f_{4n}}{\bar{q}h} \beta \\
n &= 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$(A_0 + B_0 + E_0)f_4 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n + E_n)f_{4n} = 2\bar{q}hD_0 - i\sigma l^2\beta \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}
(A_0 + B_0 + E_0)f_5 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n + E_n)f_{5n} &= \frac{\bar{q}h(1 + e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})}{2} (C_s + D_s) \\
&+ \frac{2i\sigma(-1)^s(\bar{q}h)^2}{(s\pi)^2} \beta, \quad s = 1, 2, \dots
\end{aligned} \tag{3.29}$$

$$(A_0 + B_0 - E_0)f_4 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n - E_n)f_{4n} = 2\bar{q}hlC_0 - \frac{i\sigma l^3}{3}\omega \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
(A_0 + B_0 - E_0)f_4 + \sum_{n=1}^{\infty} (B_n - E_n)f_{5n} &= \frac{\bar{q}h(1 - e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}})}{2} (C_s - D_s) \\
&+ \frac{2i\sigma l(-1)^s(\bar{q}h)^2}{(s\pi)^2} \omega, \quad s = 1, 2, \dots
\end{aligned} \tag{3.31}$$

여기서,

$$f_1 = \frac{h}{2\cosh^2 kh} \left( 1 + \frac{\sinh 2kh}{2kh} \right)$$

$$f_{1n} = \frac{h}{2\cos^2 k_n h} \left( 1 + \frac{\sin 2k_n h}{2k_n h} \right)$$

$$f_2 = \frac{\sinh kh - \sinh \bar{q}kh}{k\cosh kh}$$

$$f_{2n} = \frac{\sin k_n h - \sin \bar{q}k_n h}{k_n \cos k_n h}$$

$$f_3 = \frac{-kz_G \sinh kh - \cosh kh + k(qh + z_G) \sinh \bar{q}kh + \cosh \bar{q}kh}{k^2 \cosh kh}$$

$$f_{3n} = \frac{-k_n z_G \sin k_n h + \cos k_n h + k_n (qh + z_G) \sin \bar{q}k_n h - \cos \bar{q}k_n h}{k_n^2 \cos k_n h}$$

$$f_4 = \frac{\sinh \bar{q} kh}{k \cosh kh}$$

$$f_{4n} = \frac{\sin \bar{q} k_n h}{k_n \cos k_n h}$$

$$f_5 = \frac{(-1)^s}{k \cosh kh} \frac{\sinh \bar{q} kh}{1 + \left( \frac{s\pi}{\bar{q} kh} \right)^2}$$

$$f_{5n} = \frac{(-1)^s}{k_n \cos k_n h} \frac{\sin \bar{q} k_n h}{1 - \left( \frac{s\pi}{\bar{q} k_n h} \right)^2}$$

$$f_6 = \frac{((\bar{q} kh)^2 + 2) \sinh \bar{q} kh - 2\bar{q} kh \cosh \bar{q} kh}{k^3 \cosh kh}$$

$$f_{6n} = \frac{((\bar{q} k_n h)^2 - 2) \sin \bar{q} k_n h + 2\bar{q} k_n h \cos \bar{q} k_n h}{k_n^3 \cos k_n h}$$

### 3.2.4 부소파제의 운동방정식

부소파제에 작용하는 유체압력, 정수압적인 복원력 및 계류라인의 저항력을 고려하면 부소파제의 수평, 연직 및 회전운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

- 수평운동방정식

$$M_g \frac{d^2 x_0}{dt^2} = \int_{-qh}^0 \{p_{III}(-l, z) - p_I(l, z)\} dz - 4K_{xx}\alpha - 4K_{xz}\beta - 4K_{x\theta}\omega \quad (3.32)$$

- 연직운동방정식

$$M_g \frac{d^2 z_0}{dt^2} = \int_{-l}^l p_{II}(x, -qh) dx - 2\rho g l \beta - 4K_{zx}\alpha - 4K_{zz}\beta - 4K_{z\theta}\omega \quad (3.33)$$

- 회전운동방정식

$$\begin{aligned}
I_m \frac{d^2\theta}{dt^2} = & \int_{-qh}^0 \{p_{III}(-l, z) - p_I(l, z)\}(z - z_G)dz + \int_{-l}^l p_{II}(x, -qh)xdx \\
& - M_g g \left( \frac{l^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_G \right) \omega - 4K_{\theta x} \alpha - 4K_{\theta z} \beta - 4K_{\theta\theta} \omega
\end{aligned} \tag{3.34}$$

여기서,  $K_{ij}(i, j = x, z, \theta)$ 는 계류라인의 저항력으로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases}
K_{xx} = K_{HH} \\
K_{xz} = K_{HV} \\
K_{x\theta} = [K_{HH}(z_E - z_G) - K_{HV}(z_E - x_G)] \\
K_{zx} = K_{xz} \\
K_{zz} = K_{VV} \\
K_{z\theta} = [K_{HV}(z_E - z_G) - K_{VV}(z_E - x_G)] \\
K_{\theta x} = K_{x\theta} \\
K_{\theta z} = K_{z\theta} \\
K_{\theta\theta} = [K_{HH}(z_E - z_G)^2 - K_{HV}(z_E - z_G)(x_E - x_G) + K_{VV}(x_E - x_G)^2]
\end{cases}$$

여기서,  $(x_E, z_E)$ 는 부체계류점의 좌표이고,  $K_{HH}, K_{HV}, K_{VV}$ 는 부록을 참조 바란다.

식(3.32)~(3.34)에  $p_j = -\rho \frac{\partial \Phi_j}{\partial t} = -i\rho\sigma\phi_j$  ( $j = I, II, III$ )을 대입하여 정리하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
& i\rho\sigma(A_0 + B_0 - E_0)f_2 + i\rho\sigma \sum_{n=1}^{\infty} (B_n - E_n)f_{2n} + (M_g\sigma^2 - 2K_{xx})\alpha \\
& - 2K_{xz}\beta - 2K_{x\theta}\omega = 0
\end{aligned} \tag{3.35}$$

$$\begin{aligned}
& 2i\rho\sigma l D_0 + i\rho\sigma \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \frac{\bar{q}h}{s\pi} \left(1 - e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}}\right) (C_s + D_s) + 2K_{zx}\alpha \\
& + \left\{ 2K_{zz} - M_g\sigma^2 - \frac{\rho\sigma^2}{\bar{q}h} \left(-\frac{l^3}{3} + \frac{2l\bar{q}^2 h^2}{3}\right) + 2\rho g l \right\} \beta + 2K_{z\theta}\omega = 0
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
& i\rho\sigma (E_0 - A_0 - B_0)f_3 + i\rho\sigma \sum_{n=1}^{\infty} (E_n - B_n)f_{3n} - \frac{2i\rho\sigma l^3}{3} C_0 \\
& - i\rho\sigma \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s (C_s f_7 + D_s f_8) - 2K_{\theta x}\alpha - 2K_{\theta z}\beta \\
& + \left[ I_m\sigma^2 + \frac{\rho\sigma^2}{\bar{q}h} \left(-\frac{2l^5}{30} + \frac{2\bar{q}^2 h^2 l^3}{9}\right) - M_g g \left(\frac{l^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_G\right) - 2K_{\theta\theta} \right] \omega = 0
\end{aligned} \tag{3.37}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
f_7 &= \frac{\bar{q}h}{s\pi} \left(l - \frac{\bar{q}h}{s\pi}\right) + \frac{\bar{q}h}{s\pi} e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}} \left(l + \frac{\bar{q}h}{s\pi}\right) \\
f_8 &= -\frac{\bar{q}h}{s\pi} \left(l - \frac{\bar{q}h}{s\pi}\right) - \frac{\bar{q}h}{s\pi} e^{-\frac{2s\pi l}{\bar{q}h}} \left(l + \frac{\bar{q}h}{s\pi}\right)
\end{aligned}$$

이상으로부터 얻어지는 방정식은 식(3.24), (3.26), (3.28), (3.30)의 4개, 식(3.25), (3.27)에서 2n개, 식(3.29), (3.31)에서 2s개 및 운동방정식(3.35), (3.36), (3.37)의 3개로 총 7+2n+2s개로 구성되며, 미지수는  $B_0, E_0, C_0, D_0, \alpha, \beta, \omega$ 가 7개,  $B_n, E_n$ 이 2n개,  $C_s, D_s$ 가 2s개이므로 연립방정식의 수와 산정되어야 하는 미지수가 동일하므로 식 (3.24)~(3.31)과 식(3.35)~(3.37)을 동시에 풀면 속도포텐셜의 미정계수와 부체동요에 관한 복소진폭을 구할 수 있다.

### 3.3 특이점분포법

특이점분포법은 파동장의 지배방정식과 구조물표면에서의 경계조건을 제외한 모든 경계조건을 만족하는 Green함수를 적용하여, 구조물표면에 분포시키는 파원강도 분포함수를 매개로 하는 경계적분방정식을 수치적으로 풀어 속도포텐셜을 산정하는 해석법으로 복잡한 형상의 구조물에도 쉽게 적용된다.

#### 3.3.1 감쇠파이론

다음의 Fig. 3.2에 나타내는 바와 같이 부소파제의 주변파동장을 영역 I에서 영역 III까지 3영역으로 분할한다. 여기서, 수심은 각 영역에서 상이하더라도 관계없다. 영역 I은 입사파와 반사파가 공존하며, 영역 III은 전달파만이 존재하는 영역으로 각각 비감쇠영역으로 한다. 영역 II는 구조물에 의한 마찰, 흐름의 박리 및 와류 등으로부터 발생하는 에너지소산이 존재하므로 에너지소산을 근사적으로 고려하기 위해 감쇠파영역으로 설정된다(中村 등, 1999 ; 김 등, 2004).

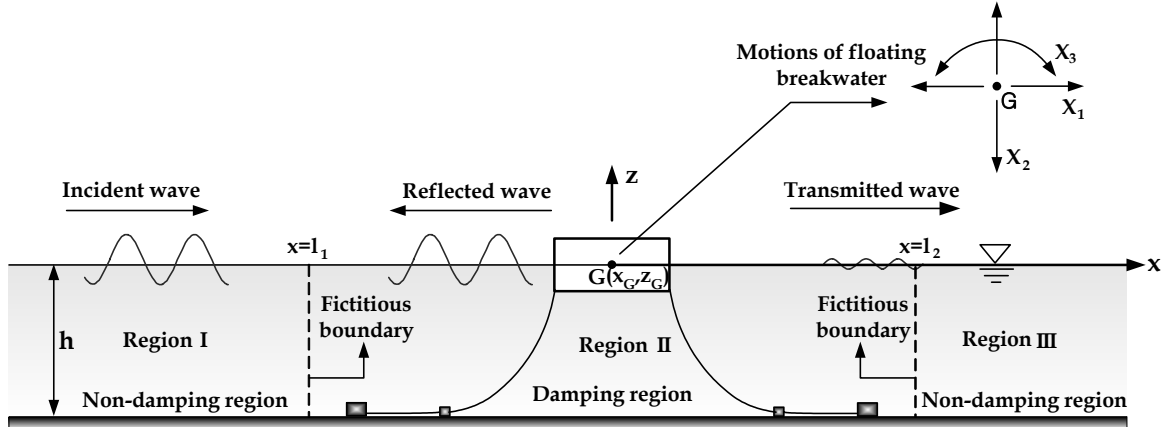


Fig. 3.2. 유체영역의 분할과 좌표계.

감쇠파영역에는 유속에 비례하는 저항이 작용하는 가상적인 유체가 설정되어 있는 것으로 하면 그의 선형운동방정식은 다음의 식으로 표현된다(Sollitt et al., 1972 ; 김 등, 1997 ; 中村 등, 1999).

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla (p + \rho g z) - f_c \sigma v \quad (3.38)$$

여기서,  $\mathbf{v}$ 는 유속벡터,  $p$ 는 유체압력,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ ,  $\rho$ 는 밀도,  $f_c$ 는 선형저항계수이다.

영역  $I$ 에서 입사파의 속도포텐셜  $\Phi_0$ 는 입사파가  $x$ 축의 (+)방향으로 진행한다고 가정하면 식(3.39)와 같이 주어진다.

$$\Phi_0(x, z, t) = -\frac{igH}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{i(kx - \sigma t)} \quad (3.39)$$

여기서,  $H$ 는 입사파고,  $k$ 는 비감쇠파의 진행파모드의 파수( $= 2\pi/L$ ,  $L$ :파장),  $i = \sqrt{-1}$ ,  $h$ 는 수심이다.

### 3.3.2 지배방정식과 경계조건

유체를 비압축성의 비회전운동으로 가정하면 각 영역에서 속도포텐셜  $\Phi_j (j = I, II, III)$ 를 정의할 수 있고, 지배방정식은 다음의 Laplace방정식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0, \quad j = I, II, III \quad (3.40)$$

입사파가 직접적으로 존재하는 영역  $I$ 에서의 속도포텐셜은 입사파, 반사파 및 발산파의 속도포텐셜  $\Phi_0$ ,  $\Phi_{DI}$ 과  $\Phi_{RI}$ 의 선형합인  $\Phi_I = \Phi_0 + \Phi_{DI} + \Phi_{RI}$ 으로 표현되고, 영역  $II, III$ 에서의 속도포텐셜은 반사파와 발산파를 고려하여  $\Phi_{II, III} = \Phi_{DII, III} + \Phi_{RII, III}$ 로 표현된다.

부체가 유체영역  $II$ 에만 존재한다고 하면, 속도포텐셜  $\Phi_j (j = I, II, III)$ 에 관한 경계조건은 다음의 식들로 구성된다.

$$\frac{\partial \Phi_{DII}}{\partial n} = 0 \text{ on the structure, } j = II$$

$$\langle \text{surface boundary condition on the fixed structure} \rangle (3.41)$$



$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = - (1 + if_c) \left( \frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2}, z = 0, j = II \\ \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = - \left( \frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2}, z = 0, j = I, III \end{cases}$$

<free water surface boundary condition> (3.42)

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0, z = -h, j = I, II, III \quad \text{<impermeable condition on sea bottom> (3.43)}$$

여기서,  $n$ 은 수중부체표면에서의 외향법선이다.

### 3.3.3 부체표면상에서의 운동학적 경계조건

부체가 파의 작용에 의해 그 무게중심  $G(x_G, z_G)$ 를 중심으로 하여 Fig. 3.2에 나타내는 각 운동모드방향으로 식(3.44)와 같이 조화진동하는 경우를 고려한다.

$$X_m(t) = \hat{X}_m e^{-i\sigma t} \quad (3.44)$$

여기서,  $X_m, \hat{X}_m$ 는 각각 변위 및 그 복소진폭, 아랫첨자  $m$ 은 각각 Swaying ( $m = 1$ ), Heaving( $m = 2$ ), Rolling( $m = 3$ )의 각 운동모드에 대응한다. 이 때, 영역  $II$ 에서 발산과의 속도포텐셜  $\Phi_{RII}$ 가 만족하여야 하는 운동학적 경계조건은 식(3.45)로 표현된다.

$$\frac{\partial \Phi_{RII}}{\partial \xi} = \frac{\partial X_1}{\partial t} \xi_1 + \frac{\partial X_2}{\partial t} \xi_2 + \frac{\partial X_3}{\partial t} \xi_3 \text{ on the structure} \quad (3.45)$$

여기서,  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 는 수중부체표면에서의 일반화된 단위법선벡터로 다음의 식으로 정의된다.

$$(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (n_X, n_Z, \{n_X(z - z_G) - n_Z(x - x_G)\}/R_B) \quad (3.46)$$

여기서,  $n_X = dx/dn$ ,  $n_Z = dz/dn$ ,  $R_B$ 는 부체의 대표길이를 나타낸다.

또한, 발산과속도포텐셜  $\Phi_{RII}$ 는 선형경계치문제를 만족하고 있으므로 식(3.47)과 같이 각각의 동요모드로 분리하여 취급될 수 있다.

$$\Phi_{RII} = \sum_{m=1}^3 (\Phi_{Rm})_{II} X_m \quad (3.47)$$

여기서,  $(\Phi_{Rm})_{II}$  ( $m = 1, 2, 3$ )은 각 운동모드에 의한 영역 II에서 발산과속도포텐셜이다.

### 3.3.4 접속조건

이 해석모델은 각 영역에서 포텐셜을 산정하고 있으므로 각 영역의 가상경계면에서 압력과 유속의 접속조건이 필요하게 된다. 영역 I과 영역 II의 접속경계점  $x = l_1$  및 영역 II와 영역 III의 접속경계점  $x = l_2$ 에 있어서 접속조건을 나타내면 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} \Phi_0 + \Phi_I = (1 + if_c)\Phi_{II}, & x = l_1 \\ \frac{\partial(\Phi_0 + \Phi_I)}{\partial n_I} = -\frac{\partial\Phi_{II}}{\partial n_{II}}, & x = l_1 \end{cases} \quad (3.48)$$

$$\begin{cases} \Phi_{III} = (1 + if_c)\Phi_{II}, & x = l_2 \\ \frac{\partial\Phi_{III}}{\partial n_{III}} = -\frac{\partial\Phi_{II}}{\partial n_{II}}, & x = l_2 \end{cases} \quad (3.49)$$

여기서,  $\partial/\partial n_j$ 는 각 영역  $j = I, II, III$ 의 경계면에서 내향법선미분을 나타낸다.

### 3.3.5 부소파제의 운동방정식

부체의 동요변위를 구하기 위해서는 부체에 작용하는 동적인 힘의 평형방정식이 필요하게 된다. 수중부체표면에 작용하는 변동압력  $p$ 는 식(3.38)의 공간적인 적분을

고려하여 얻어지는 식(3.50)으로부터 산정될 수 있다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} - \rho f_c \sigma \Phi_{II} \quad (3.50)$$

동요부체에 작용하는 파랑외력은 압력  $p$ 의 작용방향을 고려하여 표면적분함으로써 식(3.51)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} F_\alpha &= i\rho\sigma \int_{S_B} (1 + if_c) \Phi_{DII} \xi_\alpha ds \\ &+ \sum_{m=1}^3 \rho\sigma^2 X_m (1 + if_c) \int_{S_B} (\Phi_{Rm})_{II} \xi_\alpha ds, \alpha = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (3.51)$$

여기서, 아랫첨자  $\alpha$ 는 운동방향모드의 방향을 나타낸다. 그리고, 식(3.51)의 우변 제1항은 정적평형시의 부체에 작용하는 파강제력을, 제2항은 동유체력을 나타내며, 이를 각각  $F_\alpha^E$ 와  $F_\alpha^R$ 로 표기한다. 제2항의 실수부는 부가질량력, 허수부분은 조파감쇠력으로 각각 알려져 있으며, 이를 각각  $\mu_{\alpha m}$ 과  $D_{\alpha m}$ 으로 표기하는 것으로 한다. 식(3.51)로부터 알 수 있는 바와 같이 파랑외력에는 선형저항이 관계하고 있고, 이 영향이 항력을 근사적으로 나타내는 것으로 된다. 따라서, 최종적으로 부체의 운동방정식은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$(M + \mu) \frac{d^2 X}{dt^2} + D \frac{dX}{dt} + (C + K)X = F^E \quad (3.52)$$

여기서,  $X$ 는 부체의 동요벡터,  $M$ 은 관성모멘트를 포함하는 질량매트릭스,  $D$ 는 조파감쇠매트릭스,  $C$ 는 정수역학적인 복원력매트릭스,  $K$ 는 계류라인의 선형스프링 상수매트릭스,  $F^E$ 는 파강제력매트릭스를 각각 나타낸다.

### 3.3.6 특이점분포법에 의한 해석

미지포텐셜인  $\Phi_D$ ,  $\Phi_{Rm}$ 의 산정에는 식(3.53)과 같은 Green함수를 핵함수로 하는 특이점분포법을 적용한다.

$$\Phi(\eta, \zeta) = \int_{S_B} f(\eta, \zeta) G(x, z; \eta, \zeta) dS(\eta, \zeta) \quad (3.53)$$

여기서,  $(\eta, \zeta)$ 는 물체표면 및 접촉경계면의 좌표,  $f(\eta, \zeta)$ 는  $(\eta, \zeta)$ 에 분포되는 특이점강도의 분포함수,  $G$ 는 Green함수,  $(x, z)$ 는 파랑포텐셜을 구하는 유체중의 일반점,  $S$ 는 각 영역에 포함되는 물체표면 및 접촉경계면에서 구성되는 경계선영역이다. 여기서,  $G$ 는 식(3.54)와 같이 주어진다(John, 1950 ; 中村 등, 1982, 1996).

$$G(x, z; \eta, \zeta) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i(u_n^2 - \lambda^2) \cosh u_n(h+z) \cosh u_n(h+\zeta) e^{iu_n|x-\eta|}}{u_n \{(u_n^2 - \lambda^2)h + \lambda\}} \quad (3.54)$$

여기서,  $n=0$ 의 경우에  $u_0 = k$ ,  $n \geq 1$ 의 경우에  $u_n = ik_n$ 으로 주어지고,  $k_n$ 은 소멸파의 파수,  $\lambda$ 는 식(3.55)로 주어진다.

$$\lambda = \frac{\omega^2}{g} (1 + if_c) = u_n \tanh u_n h \quad (3.55)$$

따라서, 비감쇠영역인 영역 *I*과 *III*에서는 식(3.55)에서  $f_c = 0$ 으로 한 경우에 상당하는 Green함수를 적용할 수 있고, 이는 John(1950)에 의해 유도된 Green함수와 동일한 결과를 나타낸다. 구체적인 산정에서는 특이점강도의 분포함수  $f(\eta, \zeta)$ 가 미지수로 되며, 이는 식(3.41), (3.45)의 운동학적인 경계조건 및 식(3.48), (3.49)의 접촉조건을 사용하여 결정될 수 있다. 또한, 이와 같은 해석법에 있어서 감쇠파영역의 크기 및 선형저항계수는 수리모형실험에 의해 설정된다. 또한, 감쇠파영역의 크기는 부체의 양측면으로부터 바다측과 해안측으로 입사파장의 1/8까지의 수역으로 설정되었다.

### 3.4 수리모형실험

#### 3.4.1 실험방법

##### (1) 상사법칙에 의한 물리량의 축척

부소파제에 의한 파랑변형, 부체의 운동 및 계류라인의 장력 등과 같이 파동과 해안·항만구조물과의 상호작용 문제를 대상으로 하는 수리모형실험에서는 장주기파랑 응답과 같은 점성감쇠력이 탁월한 경우도 있지만, 단주기파랑의 경우가 대부분으로 점성력보다는 중력이 탁월하므로 통상적으로 Froude의 상사법칙을 적용한다. 이의 경우에 각 물리량은 다음의 Table 3.1과 같이 상사된다.

##### (2) 조파시스템

이 수리모형실험은 국립수산과학원 내에 설치되어 있는 단면2차원조파시스템을 사용하여 실시되었다. 조파시스템은 Poto 3.1에 나타난 바와 같고, 조파수조는 길이 30m, 폭 1.0m, 높이 1.2m의 크기를 가지며, 수조의 한쪽 끝에 Servo-motor에 의해 구동되는 Plunger type의 불규칙 및 규칙파조파기가 설치되어 있다. 수조의 중앙부분에 모형 부소파제를 두고, 수조의 다른 끝단에 파의 재반사를 막기 위하여 소파공을 설치하였다.

Table 3.1. Froude상사법칙에 의한 물리량의 축척.

항목	축척율	비고
구조물의 치수, 수심, 파고, 파장, 중심의 위치, 관성반경, 흘수	$l^*$	$l^* = l'/l$ $l^*$ : 길이의 상사비 $l'$ : 모형의 길이 $l$ : 원형의 길이
파의 주기, 시간, 공진주기	$t^* = (l^*)^{1/2}$	
압력	$p^* = l^*$	
힘, 파력, 중량, 계류라인의 장력	$F^* = (l^*)^3$	
관성모멘트	$I^* = (l^*)^5$	

\*원형과 모형에서 유체의 단위중량이 같은 경우

##### (3) 모형부소파제

현지에서 수심이 15~20m정도, 폰툰(부력체)의 폭이 6~7m 정도인 부소파제를 상정하였다. 이에 따라 실험에서 사용하는 모형부소파제를 대략 1/20에 해당하는 크기

로 제작하였으며, 염화비닐판의 조합으로 구성하였다. 모형은 Fig. 3.3~3.5에 나타내는 바와 같이 Fig. 3.3의 폰툰형 부소파제, Fig. 3.4의 연직판각형 부소파제 및 Fig. 3.5의 복합판형 부소파제의 3종류로 대별된다. 수리실험에서는 폰툰내부의 저판에 Ballast로 철판을 부착하여 흘수를 조정하였으며, 흘수는 부소파제 높이의  $2/3$ 정도가 되도록 하였다. 또한, 각 부소파제에 적용된 연직판과 폰툰 사이의 수평간격을 변화시켜 실험을 수행하고, 그의 변화에 따른 파랑변형과 동적응답특성을 산정함과 동시에, 최적의 파랑제어기능을 검토하였다. Fig. 3.3~3.5에 각 부소파제에 대한 치수, 중심, 중량 및 관성모멘트 등을 같이 나타내며, Photo. 3.2~3.4에 제작된 실제의 각 모형부소파제를 나타낸다.

#### (4) 계류체인

계류체인은 시중에 판매되는 체인(단위길이당 수중중량 :  $2.1gf/cm$ )을 사용하였다.

#### (5) 부소파제의 배치

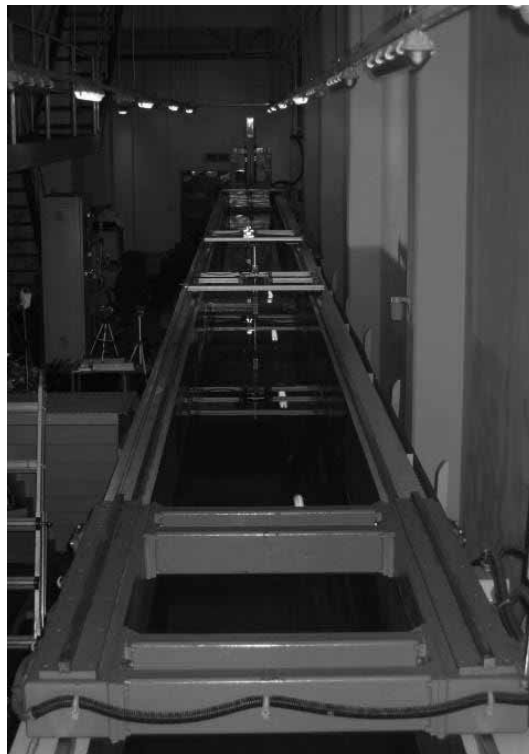
부소파제를 수조의 중앙부분에 설치하고, 부소파제의 전후에 각각 2개의 계류라인, 총 4개의 계류라인으로 부소파제를 해저에 고정된 4개의 앵커블록(Poto 3.5)에 각각 계류시켰다. 입사파향에 대한 부소파제의 측면운동을 줄이기 위하여 계류라인을 Cross로 계류하였고, 계류라인의 장력을 감소시키기 위하여 Catenary로 계류하였으며, Catenary가 끝나는 지점에 Sinker(공기중의 중량  $1.4kgf$  : Photo 3.6)를 부착하였다. Fig. 3.6에 파고계 및 계류라인의 배치간격 등의 전체적인 배치상황을 나타낸다. 여기서, 모든 부소파제의 배치는 Fig. 3.6의 경우와 동일하지만, 부소파제의 중량이 바뀌는 경우에는 흘수심이 달라지기 때문에 부체측의 계류점의 좌표가 바뀌게 된다.



(a) Plunger형 조파기.



(b) 조파기 제어기.



(c) 2차원 수조.

Photo 3.1. 2차원 조파시스템.

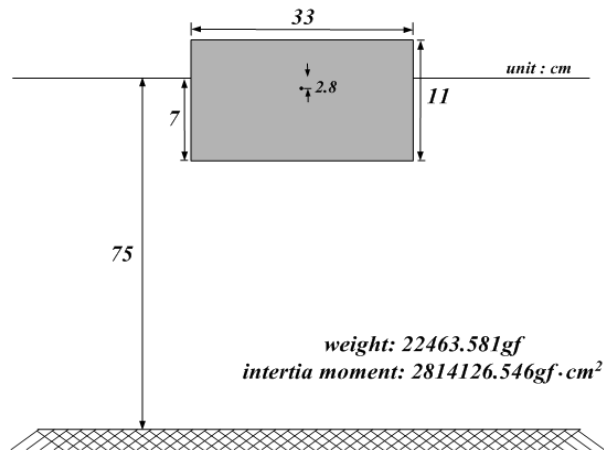


Fig. 3.3. 폰툰형 부소파제([PTFB] : Pontoon Typed Floating Breakwater).

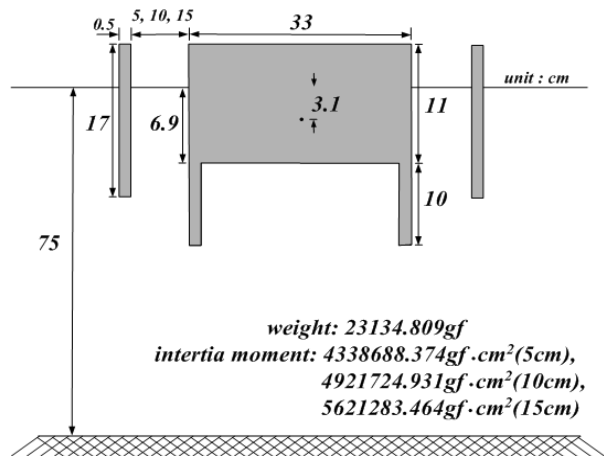


Fig. 3.4. 연직판각형 부소파제([FBVLP] : Floating Breakwater with Vertical and Leg Plates).

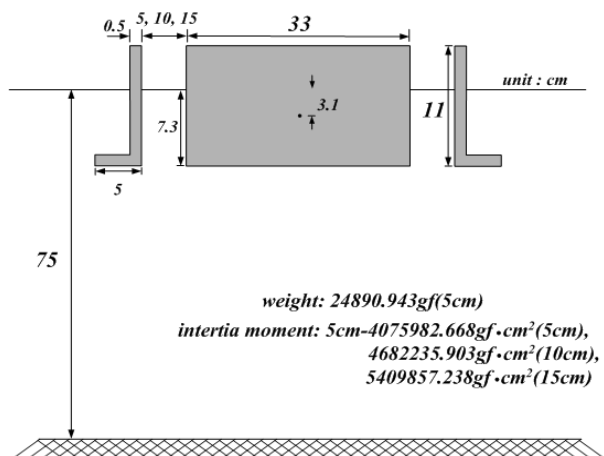


Fig. 3.5. 복합판형 부소파제([FBCPT] : Floating Breakwater with Compound Plate Types).



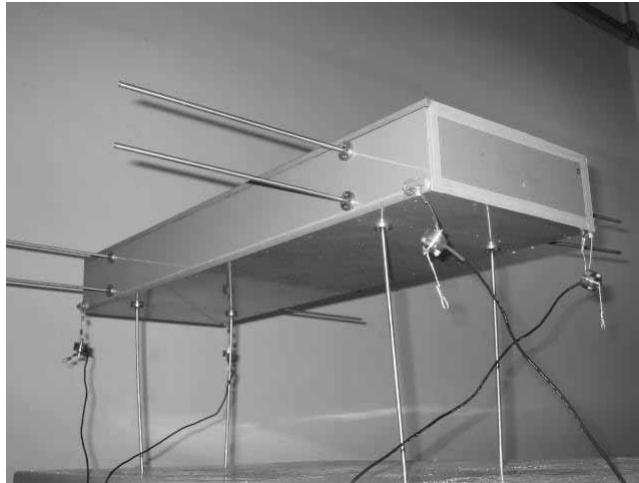


Photo 3.2. PTFB.

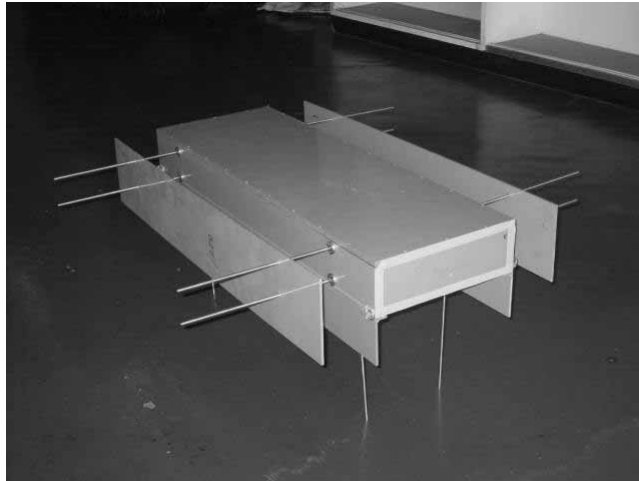


Photo 3.3. FBVLP.



Photo 3.4. FBCPT.

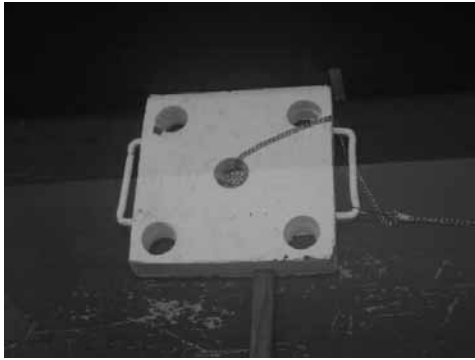


Photo 3.5. 앵커블록.

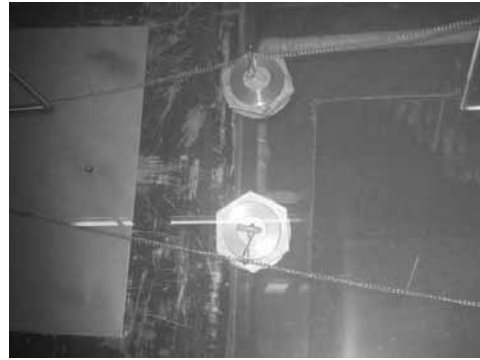


Photo 3.6. 중간싱커.

## (6) 계측장비

이 실험에서 계측항목은 수위변동(반사율과 전달율)과 부체의 운동(Swaying, Heaving, Rolling) 및 고유주기이다. Fig. 3.7에 각 계측장비의 연결상황을 나타내고 있다.

### (a) 수위변동측정

계측장비는 6대의 용량식파고계(Kenek-CHT-450), 해석용컴퓨터, 증폭기(Kenek-CH-403), A/D변환기(NI-BNC-2090)로 구성되어 있다(Photo 3.7). 증폭기는 파고계로부터 읽어들이는 신호를 증폭시키기 위하여 사용되며, 최대 출력가능범위는  $\pm 2.5V$ 이다. A/D 변환기는 증폭기를 통한 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위하여 사용되었다. 실험에서 얻어진 자료는 해석용컴퓨터를 이용하여 분석되었고, 부체 前面에 설치된 3개의 용량식파고계로부터 얻어진 데이터에 3점법(岩田好一朗・清野 博, 1982)에 의한 입·반사파분리법을 적용하여 입사파고  $H$ 와 반사율  $C_r$ 을 산정하였으며, 동일하게 후면에 설치된 3개의 용량식파고계로부터 전달파고  $H_t$ 를 산정하여  $H_t/H$ 로부터 전달율  $C_t$ 를 산정하였다. 또한, 위의 3점법에 의하여 얻어진 반사율과 전달율의 타당성을 보완하기 위하여 Healy에 의한 방법도 같이 병행하였다. 그리고, 실험과정을 모니터링하기 위하여 캠코더와 디지털카메라(Sony DSC-P50)를 사용하였다.

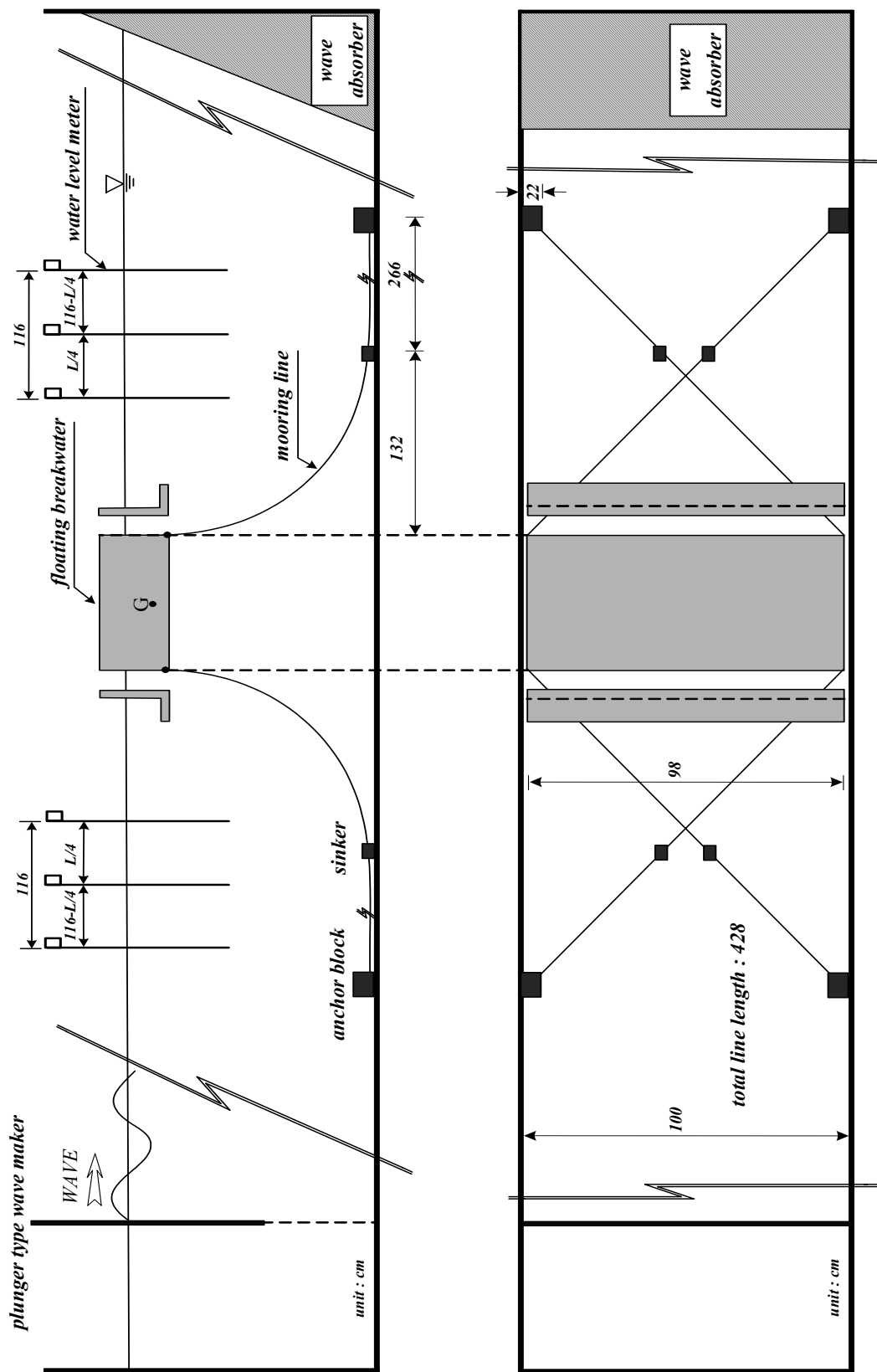


Fig. 3.6. 2차원 수조내에서 부소파제의 배치상황.

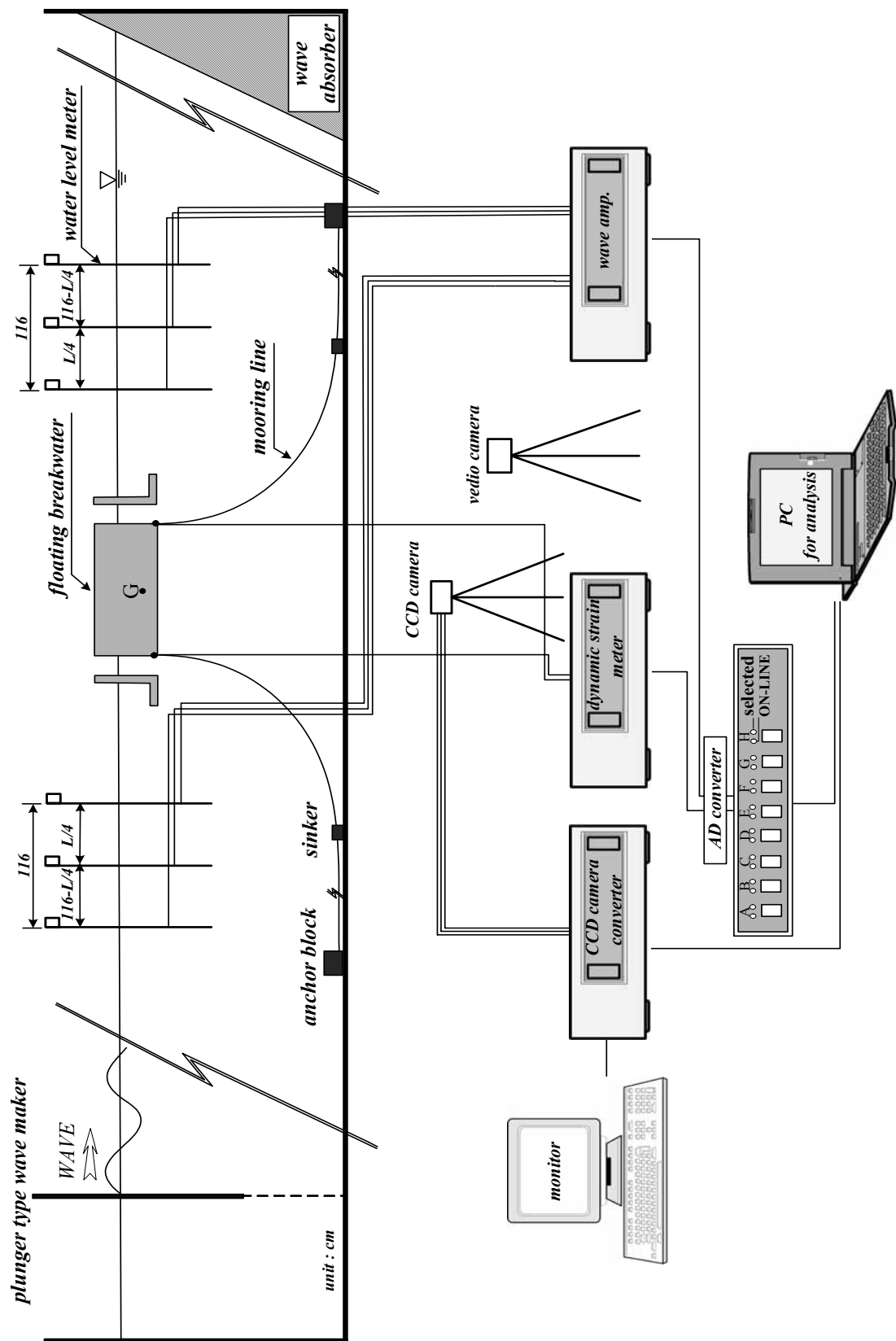


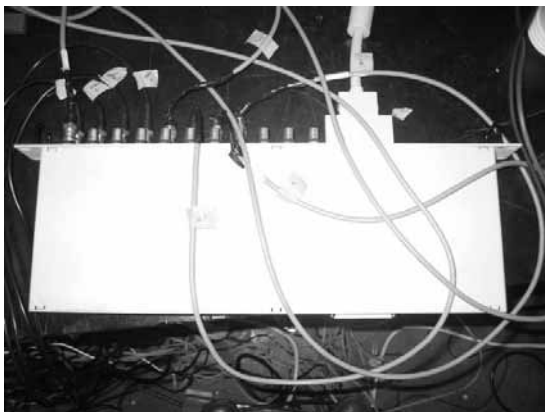
Fig. 3.7. 2차원 수조내에서 계측장비의 연결상황.



(a) 용량식파고계.



(b) 증폭기.



(c) A/D변환기.



(d) 해석용컴퓨터.

Photo 3.7. 파고측정장치.

#### (b) 부체운동 및 표류거리의 측정

운동변위는 CCD카메라(Keyence-CV-020), 변환기(Keyence-CV-2100), 모니터로 구성된 고속화상처리시스템(Photo 3.8)으로 산정되었다. CCD카메라는 부체중심의 좌표를 시간의 경과에 따라 추적하면서 중심의 Sway, Heave 및 Roll의 운동성분을 측정하기 위한 장치이며, 변환기는 CCD카메라를 통해 얻어진 영상을 디지털신호로 변환하기 위하여 사용되었다. 실험에서 얻어진 자료는 해석용컴퓨터를 이용하여 분석되었다.



(a) CCD카메라.



(b) 변환기.



(c) 모니터.

Photo 3.8. 운동측정장치.

#### (c) 계류라인의 장력측정

계류라인에 작용하는 장력을 측정하기 위하여 파력이 크게 작용하는 부체 前面에서 폰툰과 좌우 계류라인의 연결지점 2개소에 각각 1개(총 2개)의 장력계(용량 50kgf : Photo 3.9)를 부착하고, 이를 동적변위계(Unipulse-A14015 : Photo 3.10)와 A/D변환기 및 해석용컴퓨터를 통하여 측정치를 얻었다.

#### (d) 고유주기측정

부소파제의 고유주기는 계류하지 않은 자유운동의 상태에서 가속도계(Kyowa-ASW-2AZ10 ; Photo 3.11)로 측정되었으며, 이를 동적변위계와 A/D변환기에서 디지털신호로 변환된 후 해석용컴퓨터로 입력하여 Heave와 Roll의 감쇠고유운동의 시간변화 데이터를 산출하여 고유주기를 측정하였다.

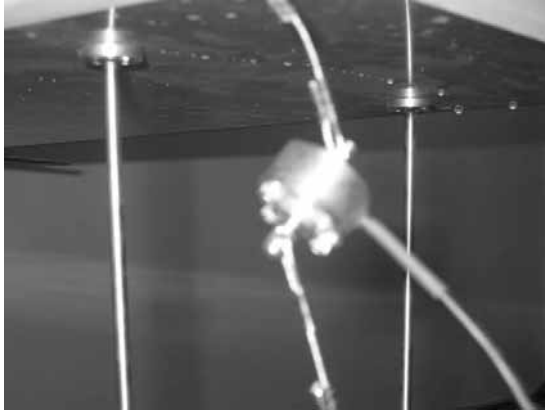


Photo 3.9. 장력계.

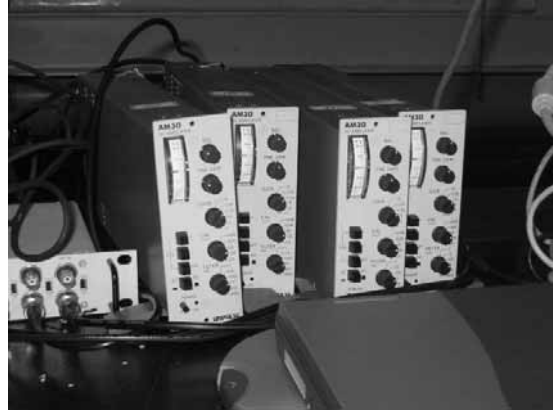


Photo 3.10. 동적변위계.

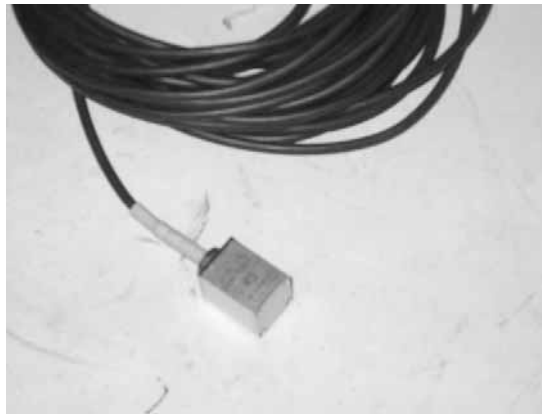


Photo 3.11. 가속도계.

### 3.4.2 실험조건

실험에 사용한 수심은 현지의 수심을 15m정도로 상정하고, 축척을 1/20로 고려하여 75cm로 정하였다. 입사파랑은 모두 규칙파이며, 작용시킨 입사파의 주기는 모형으로 0.6~1.5sec(0.1sec간격)이며, 현지의 주기로 환산하면 2.7~6.7sec정도에 해당한다. 입사주기 1.0~1.5sec에 대해서는 2개의 입사파고를 작용시켰고, 나머지 입사주기에 대해서는 1개의 파고를 입사시켰다. 이하의 Table 3.2에 실험조건을 나타내며, 이는 이 실험에서 검토되는 모든 모형 부소파제에 있어서 동일하다.

### 3.4.3 폰툰형 부소파제의 실험결과 및 고찰

Fig. 3.3 및 Photo 3.2에서 제시된 폰툰형 부소파제는 초기의 RC제 부소파제에서부터 현재 三井造船에서 제작하고 있는 PCH제 부소파제 이르기까지 가장 단순하면서

도 보편적인 형상의 부소파제이며, 파랑제어방식으로 반사방식에 속한다. 연구·개발되는 대부분의 신형식 부소파제에서도 기본적으로 폰툰형을 채용하고, 이에 여러 가지 아이디어를 추가하는 형식을 취하고 있다. 따라서, 연구·개발되는 신형식 부소파제의 기능에 대한 유효성을 검토하기 위해서는 먼저 폰툰형 부소파제의 기능성과 대비될 필요가 있다. 다음의 Photo 3.11에 수조내에 설치된 폰툰형 부소파제의 수리실험상황을 나타낸다.

Table 3.2. 실험조건.

CASE NO.	RUN NO.	수리모형실험조건(1/20)			현지환산조건			L/B
		주기(sec)	파고(cm)	파장(cm)	주기(sec)	파고(cm)	파장(cm)	
A	1	0.6	3	56.15	2.68	60	1123.0	1.70
	2	0.7	3	76.43	3.13	60	1528.6	2.32
	3	0.8	4	99.81	3.58	80	1996.2	3.02
	4	0.9	4	126.19	4.02	80	2523.8	3.82
	5	1.0	5	155.25	4.47	100	3105.0	4.70
	6	1.1	5	186.34	4.92	100	3726.8	5.65
	7	1.2	6	218.65	5.37	120	4373.0	6.63
	8	1.3	6	251.46	5.81	120	5029.2	7.62
	9	1.4	7	267.89	6.26	140	5357.8	8.61
	10	1.5	7	316.84	6.71	140	6336.8	9.60
B	11	1.0	9	155.25	4.47	180	3105.0	4.70
	12	1.1	9	186.34	4.92	180	3726.8	5.65
	13	1.2	10	218.65	5.37	200	4373.0	6.63
	14	1.3	10	251.46	5.81	200	5029.2	7.62
	15	1.4	11	267.89	6.26	220	5357.8	8.61
	16	1.5	11	316.84	6.71	220	6336.8	9.60



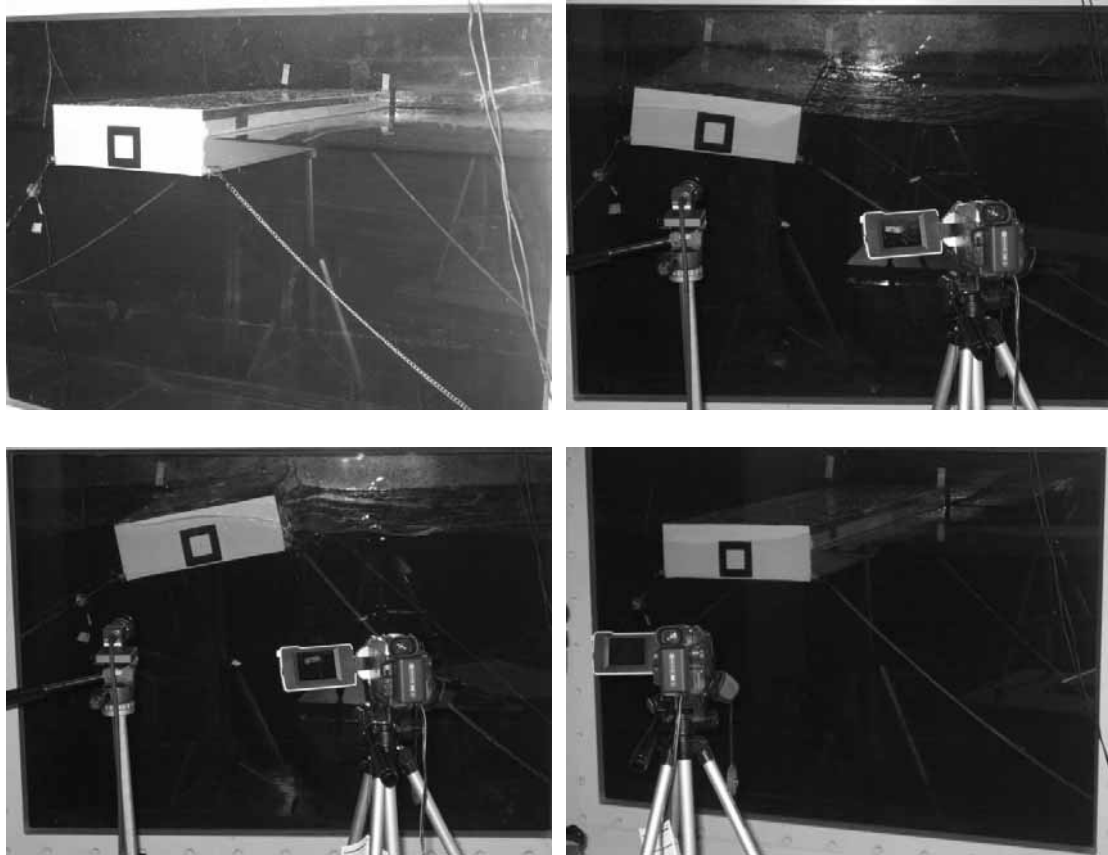


Photo 3.11. PTFB의 실험상황.

### (1) 고유주기

폰툰형 부소파제의 고유주기  $T_n$ 을 측정한 결과가 Fig. 3.8에 주어져 있다. 결과에 의하면 회전운동 및 연직운동의 고유주기는 동일하게  $T_n = 0.84\text{sec}$ 로 주어지며, 두 운동에 대한 고유주기의 차이는 없는 것을 알 수 있다. 따라서, 이의 값들로부터 입사파랑의 주기  $T \approx 0.8\text{sec}$ 에서 폰툰형 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 크게 될 것이고, 동시에 전달율이 낮아질 것으로 판단된다.

### (2) 파랑제어

Table 3.2에 주어진 실험조건에 대해서 작은 파고를 입사(폰툰형 부소파제의 각 물리량에서 동일)시킨 경우에 폰툰형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 나타낸 결과가 Fig. 3.9에 주어져 있다. 그림에서는 고유함수전개법에 의한 수치해석결과와 특이점분포법에 의한 수치해석결과를 함께 나타내었으며, 특이점분포법에서는 부체와 유체운동과의 마찰 및 우각부에서 발생하는渦 등에 의한 파랑에너지감쇠를 나타내는 감쇠율  $f_c$ 의 값,  $f_c = 0, 0.05, 0.1$ 의 변화에 따른 파랑변형의 결과도 동시에 나타내고 있

다. 수리실험결과와 비교하면, 고유함수전개법은 구조물에 의한 마찰과渦의 형성에 의한 파랑에너지감쇠를 고려하지 않기 때문에 실험치에 비해 다소 높은 값을 나타낸다. 그리고, 특이점분포법에서  $f_c=0$ 의 경우도 선형저항력을 고려하지 않기 때문에 단주기측의 반사율과 장주기측의 전달율에서 각각 수치해석결과가 다소 큰 값을 나타내지만, 고유함수전개법에 비해 전달율의 극소치가 더 작은 값을 나타내며, 반사율의 극소치는 단주기측으로 이동되었음을 볼 수 있다. 특이점분포법에서는 전체적으로  $f_c=0.1$ 의 수치해석결과가 실험치와의 대응성이 매우 향상되어 실험치를 정도 높게 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이로부터 직사각형상을 갖는 폰툰형 부소파제의 경우에는  $f_c=0.1$ 의 값을 적용하는 것이 합당한 것으로 판단된다.

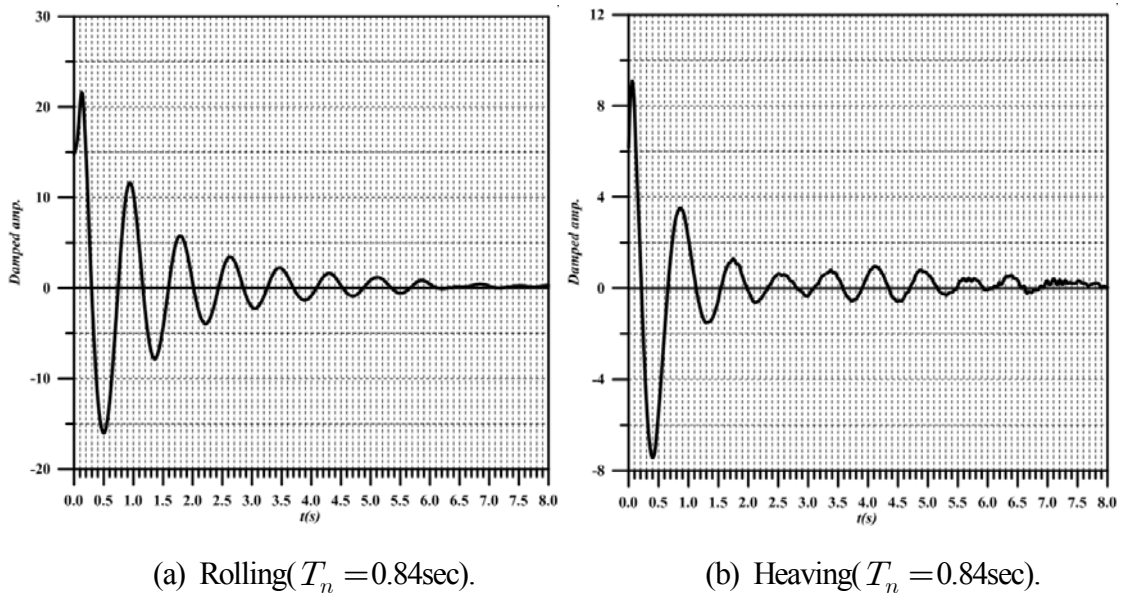


Fig. 3.8. 고유주기(PTFB).

주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화를 살펴보면 주기가 증가함에 따라 반사율은 감소하지만, 전달율의 경우에는 부체의 고유주기와 대략적으로 일치하는  $T \approx 0.78\text{sec}$ 에서 최소치  $C_t \approx 0.1$ 을 나타내고 이후에 전달율이 증가하는 현상을 볼 수 있고, 대략  $C_t > 0.8$ 인  $T > 1.1\text{sec}$ 의 영역에서는 대부분의 파랑에너지가 부소파제의 배후로 전달되는 것을 알 수 있다. 여기서, 폰툰형 부소파제의 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 0.87\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어지며, 현지파랑으로 환산하면 3.89sec보다 작은 극히 단주기파랑에 대해서만 파랑제어기능을 갖는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 폰툰형 부소파제의 일반적인 파랑제어기능의 특성이며, 이를 개량하기 위해서는 부소파제의 고유주기를 보다 장주기측으로 이동시킬 수 있

는 광폭의 폰툰형 부소파제가 요구된다. 그러나, 확폭에 따른 제작경비의 증가 및 구조적인 불안정성 때문에 확폭에는 한계가 있을 수 있다.

다음으로  $f_c=0.1$ 의 경우에 있어서 특이점분포법에 의한 수치해석결과의 타당성을 살펴보면 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화경향은 실험치와 매우 잘 일치하고 있으며,  $T \leq 0.7\text{sec}$ 의 단주기측의 반사율에서 수치해석결과 및 실험결과에 약간의 차이가 나타나지만 전반적으로 두 결과치가 잘 일치하는 것으로 판단되므로 이 수치해석결과의 타당성을 확증할 수 있다.

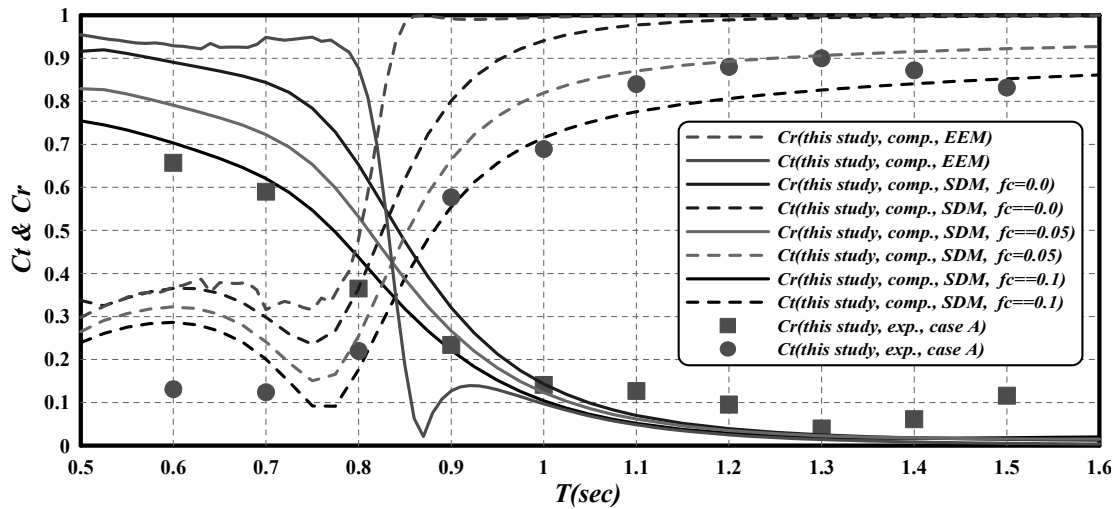


Fig. 3.9. 반사율과 전달율(PTFB).

### (3) 에너지감쇠

Fig. 3.10은 폰툰형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 파랑에너지감쇠  $E_L$ 은 다음의 식으로 정의된다.

$$E_L = 1 - C_t^2 - C_r^2 \quad (3.56)$$

결과에 의하면 주기의 증가에 따라 에너지감쇠율은 커지고, 주기 0.8sec 부근에서 최대치의 에너지감쇠 80%정도를 나타내며, 이후에는 감소한다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 두 값의 대응성은 전반적으로 만족스럽다. 여기서, 최대에너지감쇠율은 폰툰형 부소파제에 있어서 Heave 및 Roll의 고유주기에 대응되며, 이와 같은 결과는 전술한 바와 같이 Heave 및 Roll의 고유주기에서 부체의 운동이 크게 되어 우각부에서 강한 와가 형성되고, 동시에 부체구조물과 파랑운동과의 사이에 큰 마찰이 발생하여 결과적으로 많은 파랑에

너지가 소산되기 때문이다.

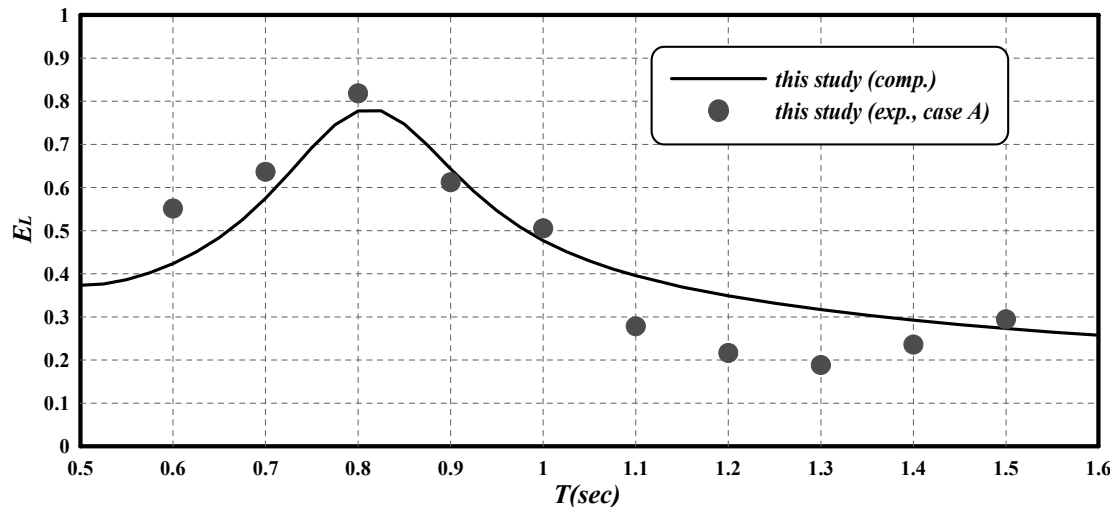


Fig. 3.10. 에너지감쇠율(PTFB).

#### (4) 부체의 운동

폰툰형 부소파제에 대한 重心의 수평운동(Swaying)을 나타낸 결과가 Fig. 3.11에 주어져 있다. 결과에 의하면 고유주기대에서 약간의 변곡점이 나타나지만 주기의 증가에 따른 무차원수평운동의 변화경향은 수치해석결과와 실험치 모두 증가하는 경향을 나타내며,  $T \geq 1.3\text{sec}$ 의 영역에서는 두 해석결과 사이에 약간의 차이를 볼 수 있지만 전체적으로는 잘 일치하고 있다. 여기서,  $T \approx 0.8\text{sec}$ 에서 변곡점이 발생하는 것은 수평운동과 회전운동이 연성운동을 하기 때문이며, 이는 후술하는 회전운동에서

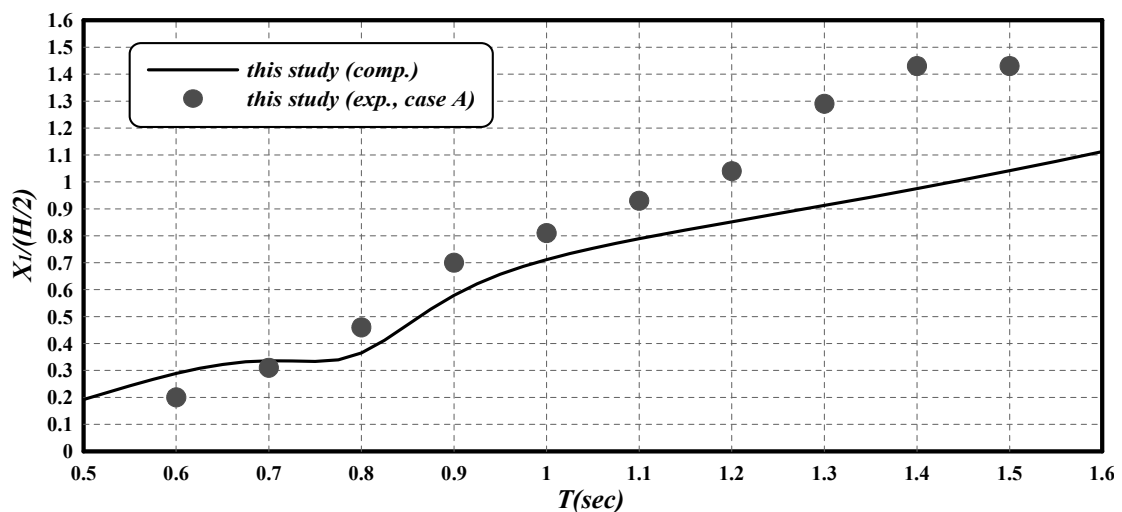


Fig. 3.11. Swaying(PTFB).

고유주기에 대응한다. 수평운동에서 주기가 길어지면 운동량이 증가하는 것은 계류라인이 Catenary계류되어 있기 때문이며, 계류라인이 긴장계류되어 있는 경우에는 Catenary의 경우와는 상이한 결과를 나타내는 것이 일반적이다.

다음의 Fig. 3.12에는 폰툰형 부소파제에 대한 重心의 연직운동(Heaving)을 나타낸 결과가 주어져 있다. 그림을 살펴보면 주기가 증가함에 따라 무차원연직운동의 최대값이 주어지는  $T \approx 0.9\text{sec}$ 까지는 무차원연직운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 약간 감소하지만 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 여기서, 무차원연직운동의 최대값이 나타나는  $T \approx 0.9\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 연직운동의 고유주기에 대응된다는 것을 알 수 있다. 여기서, 연직운동의 고유주기대에서 최대의 연직운동을 나타내고, 좌우의 주기대에서 운동량이 감소하여 가는 경향은 부소파제의 연직운동에서 나타나는 일반적인 특징으로 알려져 있다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과의 대응성은 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 매우 잘 일치하고 있다.

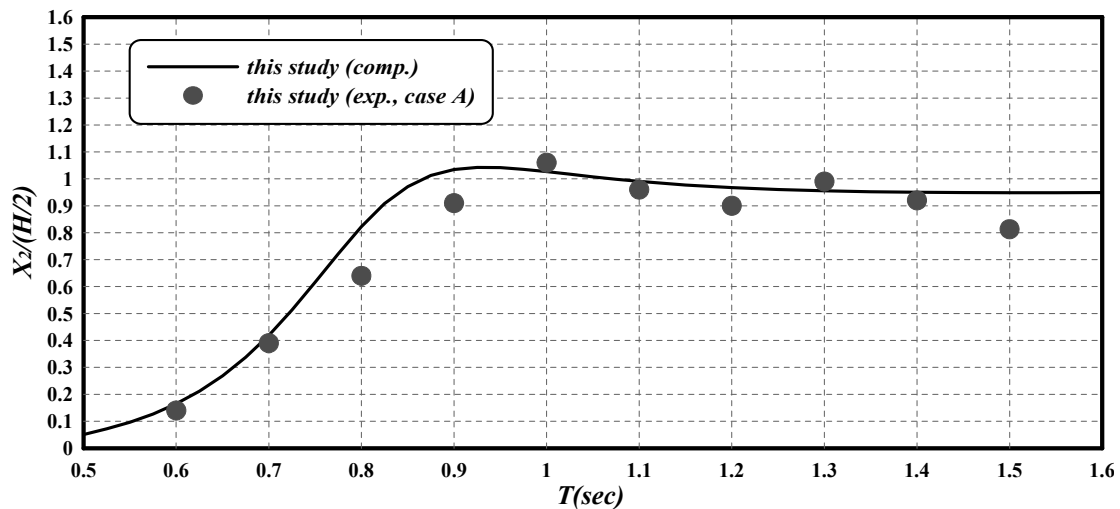


Fig. 3.12. Heaving(PTFB).

폰툰형 부소파제에 대한 重心의 회전운동(Rolling)을 나타낸 결과가 Fig. 3.13에 주어져 있다. 그림으로부터 주기가 증가함에 따라 무차원회전운동의 최대값이 주어지는  $T \approx 0.84\text{sec}$ 까지는 무차원회전운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 여기서, 무차원회전운동의 최대값이 나타나는  $T \approx 0.84\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 회전운동의 고유주기에 상당하는 것을 알 수 있다. 따라서, 연직운동의 경우와 동일하게 회전운동의 고유주기에서 최대의 회전운동을 나

타내고, 좌우의 주기대에서 운동량이 감소하여 가는 경향을 볼 수 있으며, 이는 부소파제의 회전운동에서 나타나는 일반적인 특징이다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과의 대응성은 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 미소하므로 폰툰형 부소파제의 회전운동에서는 비선형성의 영향이 탁월하지 않은 것으로 판단된다.

부체의 연직운동 및 회전운동은 파동장에서 발산파로 나타나고, 이는 입사파 및 전달파와 위상차를 가지므로 파랑이 제어된다. 따라서, 두 운동의 결과는 파랑변형에 직접적인 영향을 미치고, 두 운동의 고유주기대 근방에서 전달파가 작아지는 결과로 나타난다.

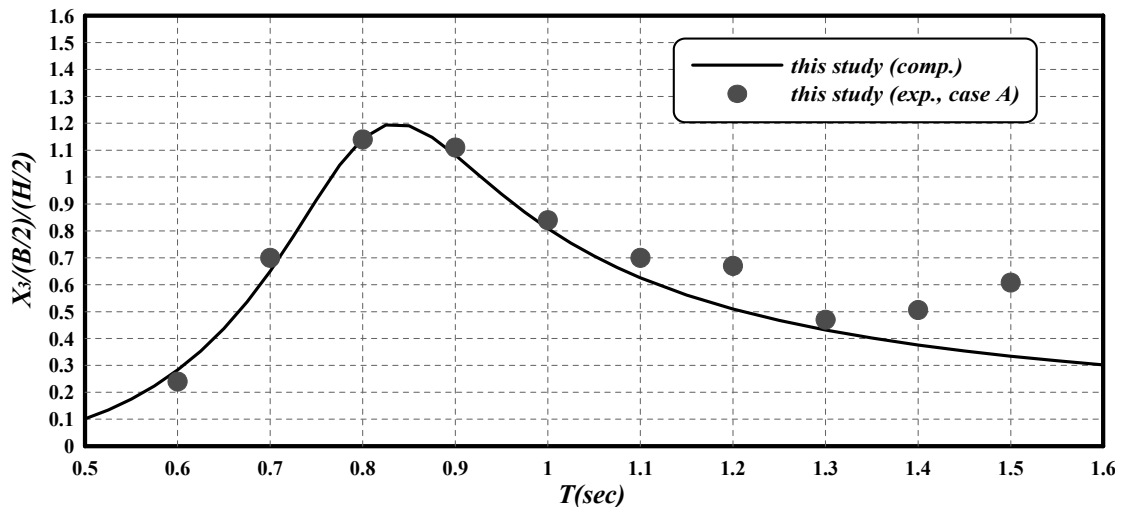


Fig. 3.13. Rolling(PTFB).

##### (5) 표류거리

다음의 Fig. 3.14는 비선형파랑의 질량수송속도에 기인한 표류력(Drift force)으로 발생하는 부체의 표류거리  $D_d$ 를 입사파장  $L$ 로 무차원하여 주기의 변화에 따라 무차원표류거리  $D_d/L$ 를 나타낸 결과이다. 일반적으로 부체의 단위길이당 표류력은 다음의 식으로 표현된다.

$$D_F = \frac{\rho g H^2}{8} (1 - C_t^2) \quad (3.57)$$

위의 식으로부터 파랑에너지가 보존되는 경우에는  $1 - C_t^2 = C_r^2$ 로 나타낼 수 있기 때문에 기본적으로 표류력 및 표류거리는 반사율의 함수로 주어진다.

폰툰형 부소파제의 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.9의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.14의 무차원표류거리의 변화과정은 주기의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터도 장주기측으로 될수록 반사율이 작아지고 대부분의 입사파랑이 전달된다는 것을 추정할 수도 있을 것이다. 그림에서 무차원표류거리가 (-)의 값을 나타내는 것은 이론적으로는 있을 수가 없지만, 수리실험에서는 수조 내의 소파공에 의한 소파가 완전하지 않아 일부의 파랑에너지가 재반사되기 때문인 것으로 판단된다.

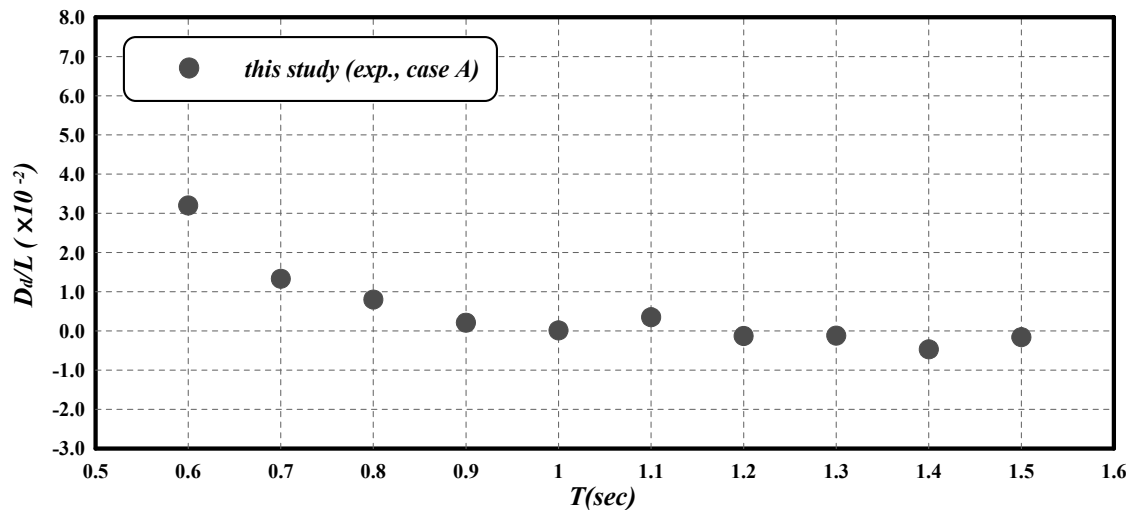


Fig. 3.14. 표류거리(PTFB).

#### (6) 계류라인의 장력

계류라인의 장력에서, 특히 Catenary계류되어 있는 경우에는 비선형성이 매우 강하게 나타나며, 이는 부소파제의 일반적인 특징이다. 따라서, 계류라인의 장력을 수치해석적으로 산정하는 것은 매우 어렵고, 일반적으로 기존의 수리실험결과에 기초하여 추정하거나 수리실험으로부터 산정한다.

Fig. 3.15에 주기의 변화에 따른 무차원장력치( $T_L$ 은 계류장력,  $W$ 는 공기중에서 부소파제의 중량)의 변화를 나타내고 있다. 최대무차원장력은 0.17정도의 값을 나타내고 있으며, 최대장력은 부소파제 중량의 대략 17%정도에 이른다는 것을 알 수 있다.  $T=0.6, 0.7, 0.9$  및  $1.1\text{sec}$ 의 경우에 계류라인의 장력은 계류삭에 인발되는 힘이 거의 작용하지 않기 때문에 Catenary로 되는 계류라인의 길이의 시간변화에 따른 계류라인의 변동중량이 대부분을 차지하게 된다. 이와 같은 장력의 특성은 일반적으로 입사파랑조건, Sinkers의 위치 및 중량과 계류라인의 총길이 등과 같은 설치조건에 민감하게 반응하므로 수리실험으로부터 정확히 추산하는 것이 중요하다. 일반적으로 입사주기가 길어지면 유체운동의 궤적이 길어지고, 이에 따라 부체의 수평운동이 커지

기 때문에 계류라인의 장력이 증가하게 된다. 따라서, 계류라인을 충분히 길게 하면 계류장력을 상당히 줄일 수 있을 것이다.

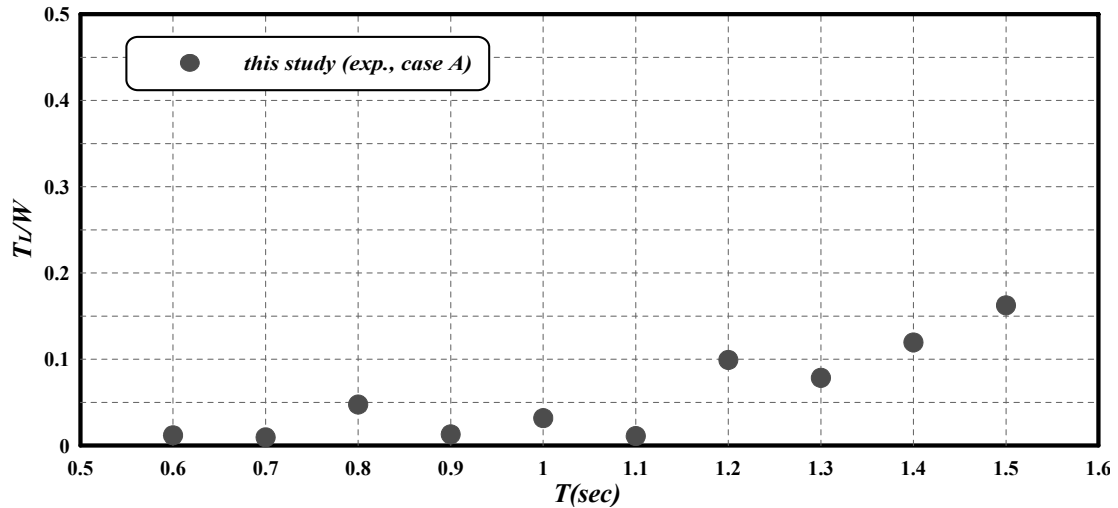


Fig. 3.15. 계류라인의 장력(PTFB).

### 3.4.4 연직판각형 부소파제의 실험결과 및 고찰

Fig. 3.4 및 Photo 3.3에서 제시된 연직판각형 부소파제는 원전어항에 건설되는 부소파제와는 치수가 약간 상이하지만 형상은 동일하다. 이 형상의 부소파제는 폰툰과 전후 연직판 사이의 유수실내에서 피스톤 모드의 공진현상이 발생하고, 더불어 강한 와가 형성되어 많은 파랑에너지가 감쇠되는 것으로 알려져 있다. 이하에서는 폰툰과 전후 연직판 사이의 수평간격의 변화가 파동장과 부체의 동적거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 그의 수평간격을 5, 10, 15cm로 각각 변화시켜 수리모형실험을 수행하였다. 아래의 Photo 3.12에 수리실험상황을 나타낸다.

다음으로, 전술한 폰툰형 부소파제와 같이 연직판각형 부소파제의 경우에 대해서도 에너지감쇠율  $f_c$ 의 값을 조정하여 수치해석을 실시하고, 그 결과를 실험치와 비교하여 가장 합당한 것으로  $f_c=0.1$ 의 값을 산출할 수 있었다. 따라서, 이하에서 제시하는 연직판각형 부소파제의 모든 수치해석결과(파랑변형과 운동량 및 계류라인의 장력)에 에너지감쇠율로  $f_c=0.1$ 의 값을 적용하였다.



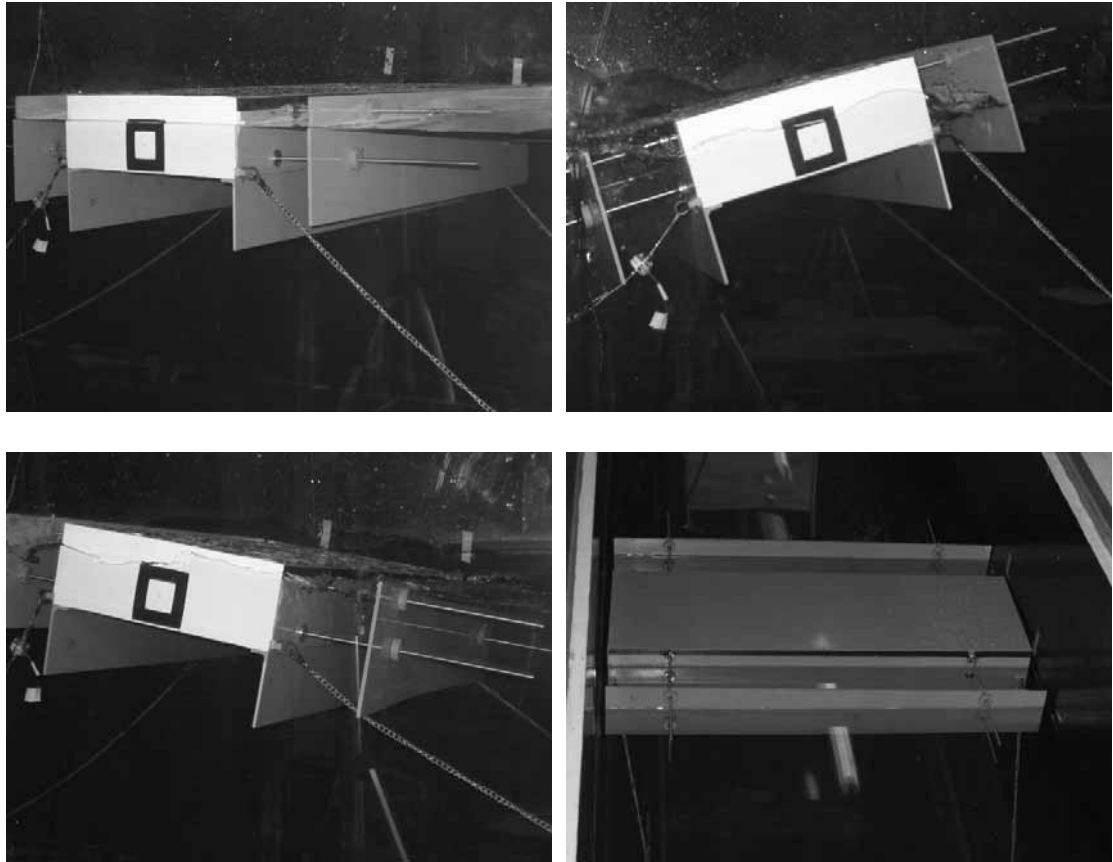
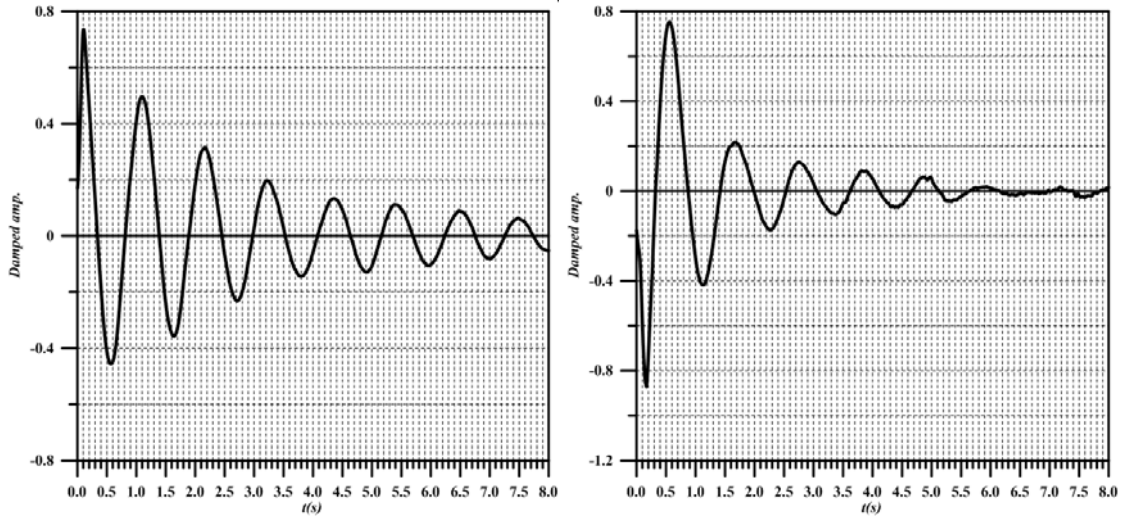


Photo 3.12. FBVLP의 실험상황.

### (1) 수평간격이 5cm인 경우

#### (a) 고유주기

수평간격이 5cm인 연직판각형 부소파제의 고유주기를 측정한 결과가 Fig. 3.16에 주어져 있다. 결과에 의하면 폰툰형 부소파제의 고유주기 0.84sec보다는 긴 회전운동의 고유주기  $T_n = 1.0\text{sec}$ , 연직운동의 고유주기  $T_n = 1.10\text{sec}$ 를 얻을 수 있으며, 두 운동에 있어서 고유주기의 차이는 크게 나타나지 않는다. 따라서, 이의 값들로부터 입사파랑의 주기  $T \approx 1.05\text{sec}$ 에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 매우 크게 될 것이고, 동시에 전달율이 매우 작아질 것으로 판단된다.



(a) Rolling( $T_n = 1.0\text{sec}$ ).

(b) Heaving( $T_n = 1.10\text{sec}$ ).

Fig. 3.16. 고유주기(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

#### (b) 파랑제어

Table 3.2에 주어진 실험조건에 대해서 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 나타낸 결과가 Fig. 3.17에 주어져 있다. 그림에서 ●, ■의 결과는 Table 3.2의 실험조건에서 작은 입사파고에, ○, □의 결과는 큰 입사파고에 각각 대응하는 수치실험결과(이하 동일)이다.

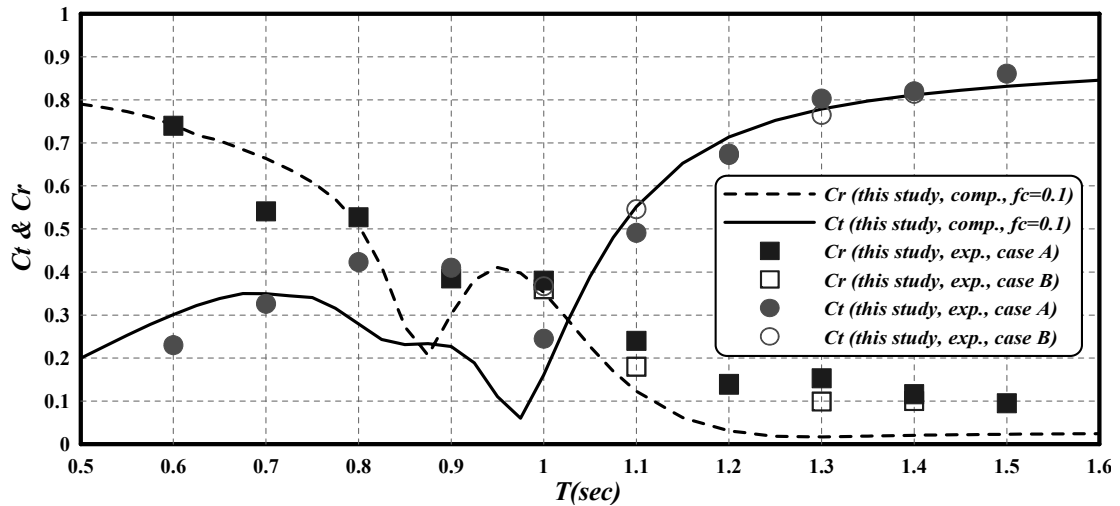


Fig. 3.17. 전달율과 반사율(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

주기의 변화에 따른 파랑변형율의 변화를 살펴보면 주기가 증가함에 따라  $T \approx 0.95\text{sec}$ 에서 극대치를 나타내는 것을 제외하면 반사율은 전체적으로 감소하지만, 전

달울의 경우에는 부체의 고유주기와 대략적으로 일치하는  $T \approx 0.98\text{sec}$ 에서 최소치  $C_t \approx 0.07$ 을 나타내고 이후에 전달율이 증가하는 현상을 나타낸다. 그리고,  $C_t > 0.8$ 인 대략  $T > 1.35\text{sec}$ 의 영역에서는 대부분의 파랑에너지가 부소파제의 배후로 전달되는 것을 알 수 있다. 여기서, 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 1.1\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어지며, 현지파랑으로 환산하면 4.9sec보다 작은 주기의 파랑에 대해서 효과적인 파랑제어기능을 갖는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 상당히 개선된 결과를 나타내며, 원전어항의 설계파랑(유의주기  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ , 유의파고  $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ )을 고려하면 항내정온도를 30.0cm 이하로 유지할 수 있는 것으로 판단된다.

다음으로 수치해석결과의 타당성을 살펴보면  $T = 0.8, 0.9\text{sec}$ 의 전달율에서 실험치와 약간의 차이를 나타내지만, 주기의 변화에 따른 파랑변형율의 변화경향은 실험치와 매우 잘 일치하고 있으며, 더불어 두 값의 대응성이 매우 양호하므로 이 수치해석결과의 타당성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

#### (c) 에너지감쇠

Fig. 3.18은 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠율을 나타낸 결과이다. 그림의 결과에 의하면 주기가 증가하면서 에너지감쇠율은 커지고, 주기 0.95sec 부근에서 최대의 에너지감쇠 95%정도를 나타내며, 이후에는 에너지감쇠율이 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 두 값의 대응성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 여기서, 에너지감쇠율의 최대값은 폰툰형 부소파제에 있어서와 같이 Heave 및 Roll의 고유주기와 거의 일치하며, 이와 같은 결과는 폰툰형 부소파제에서 언급한 바와 같이 Heave 및 Roll의 고유주기에서 부체의 운동이 크게 되어 우각부에서 강한 와가 형성되고, 동시에 부체구조물과 파랑운동과의 사이에 큰 마찰이 발생하여 결과적으로 많은 파랑에너지가 소산되기 때문이다.

#### (d) 부체의 운동

수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 수평운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.19에 주어져 있다. 얻어진 결과에 따르면 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다  $T > 1.1\text{sec}$ 의 장주기측에서 작은 운동량을 나타낸다. 주기의 증가에 따른 무차원수평운동의 변화경향은  $T \approx 0.95\text{sec}$ 에서의 극대치를 제외하면 폰툰형 부소파제와 유사하게 수치해석결과와 실험치 모두 증가하는 경향을 나타내며, 모든 주기대에 걸쳐서 두

해석결과가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고, 입사파고의 차이에 따른 두 실험해석결과와의 차이에서 부분적으로 비선형성을 약간 나타내지만 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 수평운동에서 비선형성의 영향은 매우 적은 것으로 판단된다. 수평운동에서 주기가 길어지면 운동량이 증가하는 것은 폰툰형 부소파제에서 언급한 바와 같이 계류라인이 Catenary계류되어 있기 때문이며, 계류라인이 긴장계류되어 있는 경우에는 역시 Catenary의 경우와는 상이한 결과를 나타낼 것으로 예측된다.

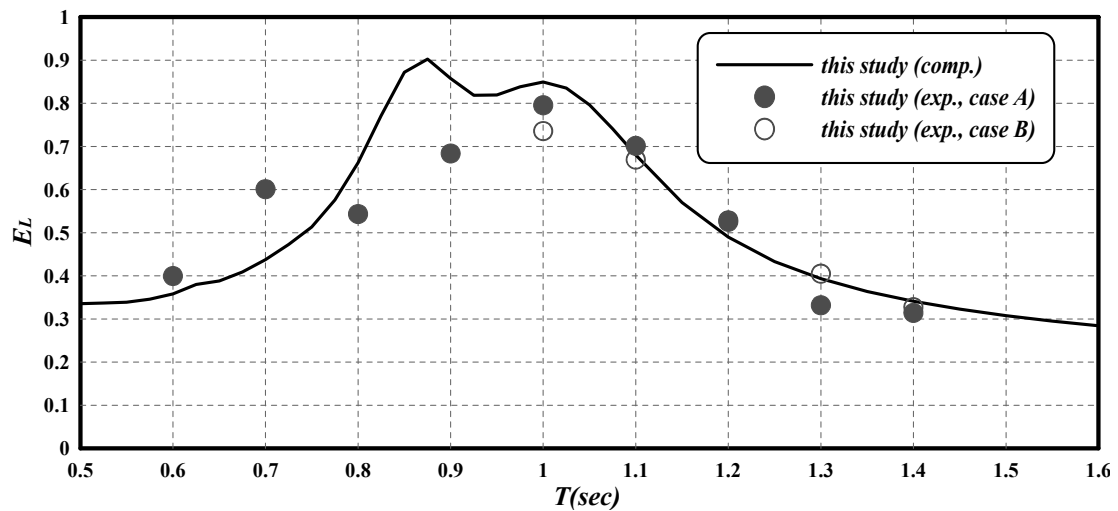


Fig. 3.18. 에너지감쇠율(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

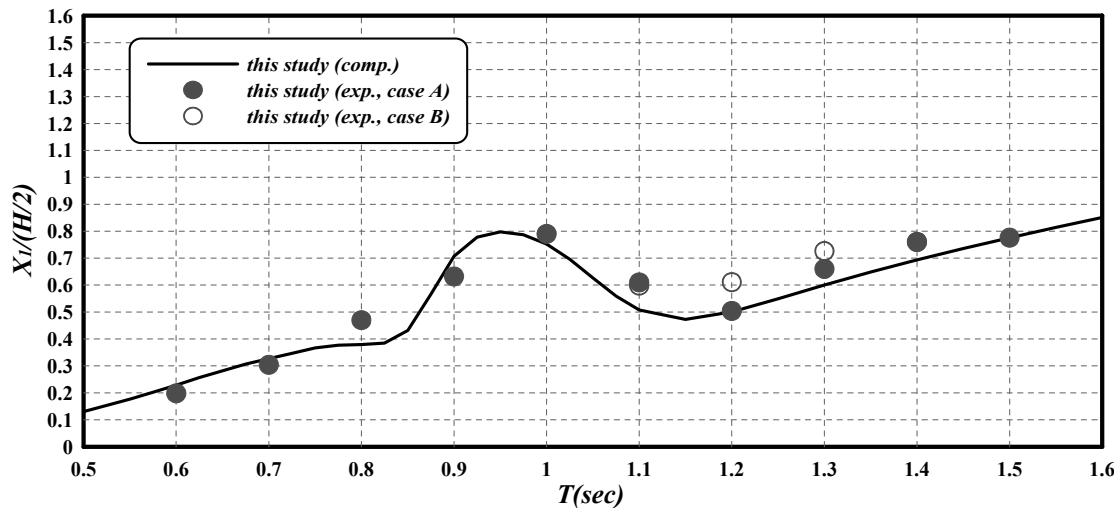


Fig. 3.19. Swaying(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

Fig. 3.20은 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 연직운동을 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 수치해석결과에서는 주기가 증가함에 따라 무차원연직

운동의 최대값이 주어지는  $T \approx 1.0\text{sec}$ 까지는 무차원연직운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에, 수리실험결과에서는 이와는 상이한 결과를 나타내고 있으며,  $T \approx 1.0\text{sec}$ 가 아니라  $T \approx 1.25\text{sec}$ 에서 최대치를 나타내고 있다. 이와 같은 실험결과는 고유주기 근처인  $T \approx 1.05\text{sec}$ 에서 부체의 운동이 크게 되고, 이에 수반하여 부체의 상면을 통한 월류가 발생함으로써 부체의 연직운동이 억제되기 때문이며, 동시에 연직운동이 커짐에 따라 Sinker의 저항도 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 실험결과와 수치해석결과의 대응성은 고유주기대 근방에서의 결과치를 제외하면 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량이 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 미소하므로 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 연직운동에서 비선형성의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

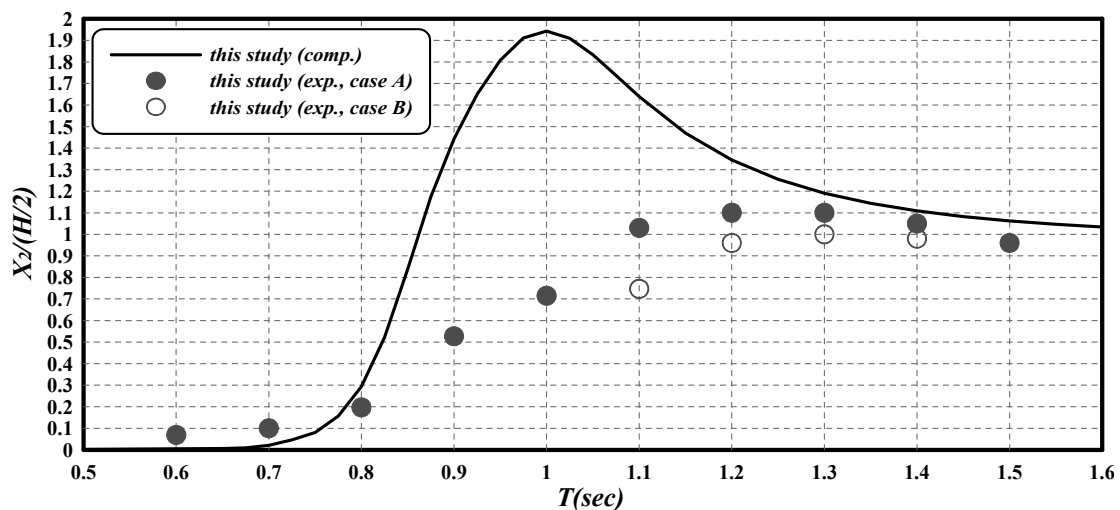


Fig. 3.20. Heaving(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

다음의 Fig. 3.21은 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 회전운동을 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 폰툰형의 경우보다는 최대운동량이 나타나는 위치가 장주기측으로 이동되어 있고, 또한 그 값도 크다는 것을 알 수 있다. 이의 결과는 고유주기가 폰툰형 부소파제의 경우보다 길기 때문이다. 주기가 증가함에 따라 무차원회전운동의 최대값이 주어지는  $T \approx 1.03\text{sec}$ 까지는 무차원회전운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서 감소하는 경향은 폰툰형 부소파제의 경우와 유사하다. 여기서, 무차원회전운동의 최대값이 나타나는  $T \approx 1.03\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 회전운동의 고유주기에 대응하는 것을 알 수 있다. 따라서, 연직운동의 경우와 동일하게 회전운동의 고유주기에서 최대의 회전운동을 나타내고, 좌우의 주기대에서 운

동량이 감소하여 가는 경향을 나타낸다. 이는 폰툰형 부소파제에서 지적인 바와 같이 부소파제의 회전운동에서 나타나는 일반적인 특징으로 알려져 있다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과는 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 매우 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 변화에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 회전운동에서 비선형성의 영향은 탁월하지 않은 것으로 판단된다.

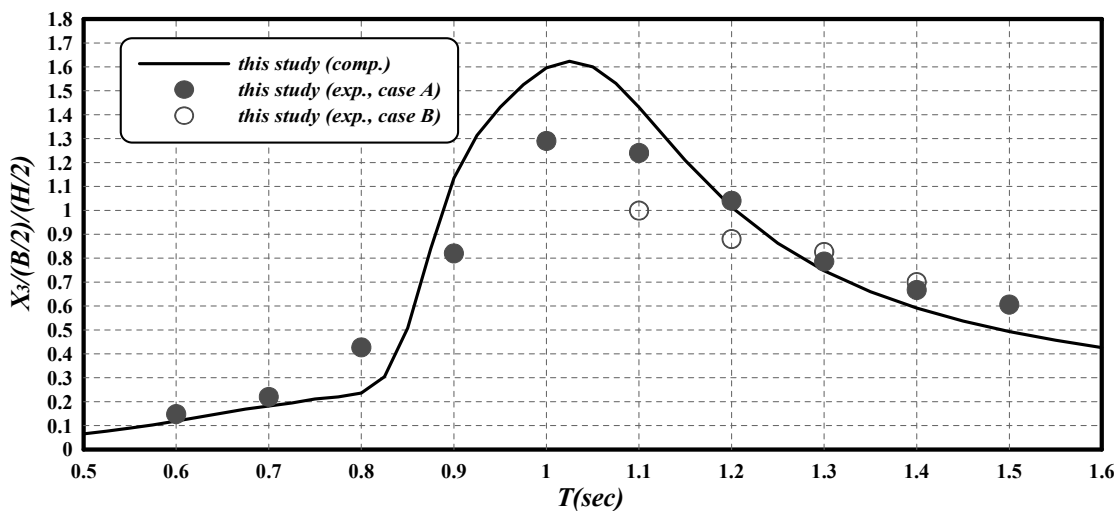


Fig. 3.21. Rolling(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

#### (e) 표류거리

다음의 Fig. 3.22는 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제에 있어서 표류력에 의한 표류거리를 나타낸 결과이다. 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.17의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.22의 무차원표류거리의 변화과정은 반사율에서 고유주기대 0.8~1.0sec의 극소치 및 극대치의 주변값을 제외하면 주기의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터도 전술한 바와 같이 장주기측으로 이동할수록 반사율이 작아지고 대부분의 입사파랑이 전달된다는 것을 추정할 수 있을 것이다. 그림에서 무차원표류거리가 (-)의 값을 나타내는 것은 이론적으로는 있을 수가 없지만, 수리실험에서는 수조내의 소파공에 의한 소파가 완전하지 않아 일부의 파랑에너지가 재반사되기 때문인 것으로 판단된다.

#### (f) 계류라인의 장력

Fig. 3.23에 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 경우에 주기의 변화에 따른 무차원장력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 동일한 주기에서 입사파고의 차이에 따라 그 결과치의 차이는 매우 크게 나타나며, 입사파고가 클수록 계류장력도 크게 된

다는 것을 알 수 있다. 여기서 무차원장력의 최대값은 대략 고유주기대 근방에서 발생한다는 것을 알 수 있고, 그의 값으로부터 최대장력은 부소파제 중량의 대략 19% 정도에 이른다는 것을 알 수 있다.

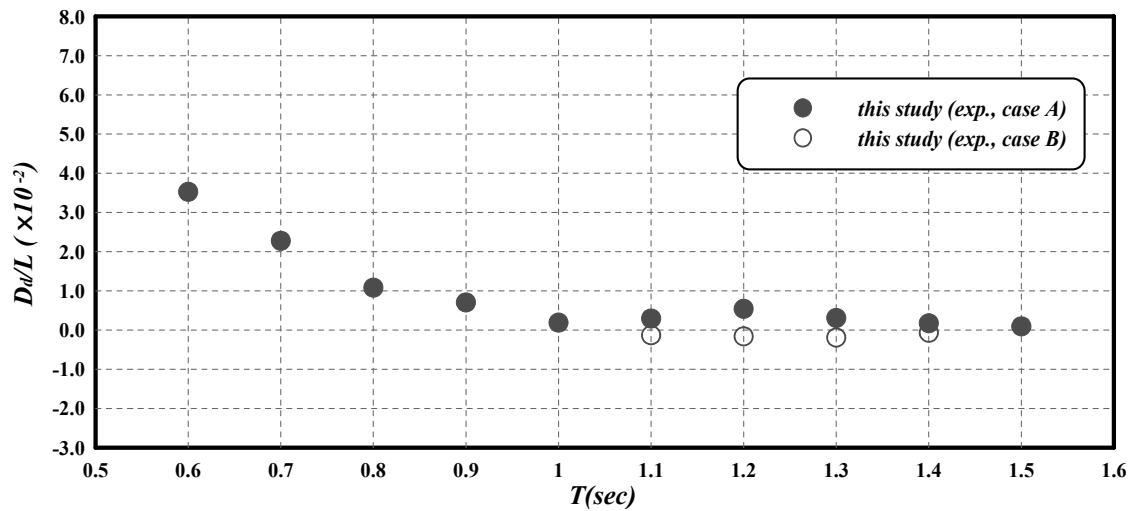


Fig. 3.22. 표류거리(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

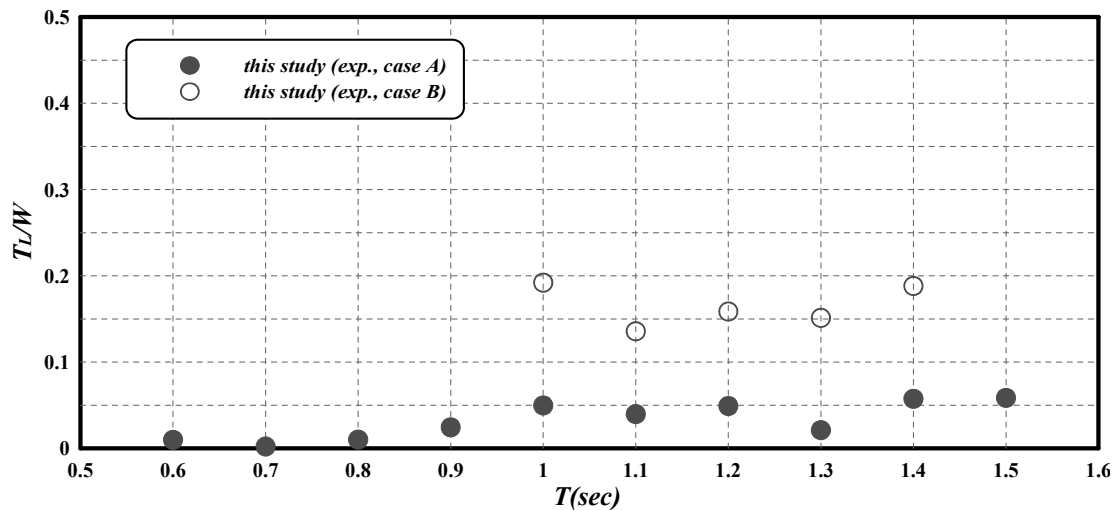


Fig. 3.23. 계류라인의 장력(FBVLP, 수평간격 : 5cm).

## (2) 수평간격이 10cm인 경우

### (a) 고유주기

수평간격이 10cm인 연직판각형 부소파제의 고유주기를 측정한 결과를 Fig. 3.24에 나타낸다. 결과에 의하면 폰툰형 부소파제의 경우보다는 길고 수평간격이 5cm의 경우와는 거의 동일한 회전운동의 고유주기  $T_n = 1.11sec$ , 연직운동의 고유주기  $T_n =$

0.99sec를 나타내며, 두 운동에 대한 고유주기의 차이는 매우 작다. 따라서, 이의 값들로부터 입사파랑의 주기  $T \approx 1.05\text{sec}$ 에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 매우 크게 될 것이고, 동시에 전달율이 매우 작아질 것으로 판단된다.

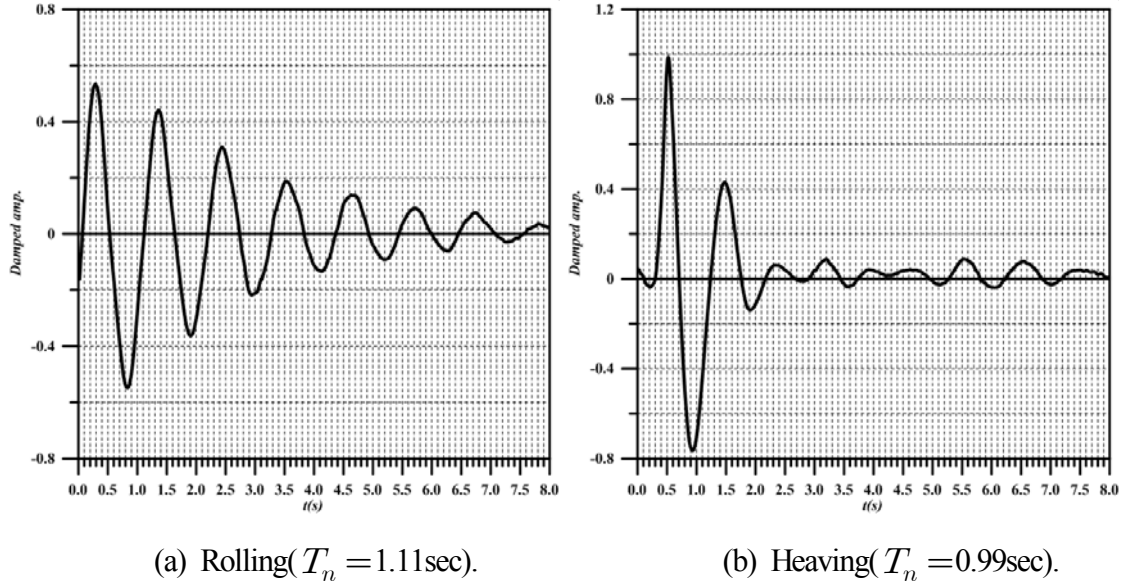


Fig. 3.24. 고유주기(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

#### (b) 파랑제어

Fig. 3.25는 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 나타낸 결과이다. 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화를 살펴보면 주기가 증가함에 따라  $T \approx 0.98\text{sec}$ 에서 약간 상승하는 경향을 제외하면 반사율은 감소하지만, 전달율의 경우에는 부체의 고유주기와 대략적으로 일치하는  $T \approx 1.0\text{sec}$ 에서 최소치  $C_t \approx 0.098$ 을 나타내고 이후에 전달율이 증가하는 현상을 나타내며,  $C_t > 0.8$ 인 대략  $T > 1.4\text{sec}$ 의 영역에서는 대부분의 파랑에너지가 부소파제의 배후로 전달되는 것을 알 수 있다. 여기서, 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 1.12\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어지며, 현지파랑으로 환산하면 5.0sec보다 작은 주기의 파랑에 대해서 효과적인 파랑제어기능을 갖는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 상당히 개선된 결과를 나타내며, 원전어항에서 설계파랑을 고려하면 항내정온도를 28.0cm 이하로 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 수평간격 5cm의 경우와 비교하면 장주기측으로 약간 이동된 회전운동의 고유주기로 인하여  $T \geq 1.2\text{sec}$ 의 장주기측 및  $T \leq 1.0\text{sec}$ 의 단주기측에서 보다 향상된 파랑제어기능을 나타내고 있다.



다음으로 수치해석결과의 타당성을 살펴보면 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화 경향은  $T=0.8\text{sec}$ 의 반사율에서 약간의 차이를 나타내지만 실험치와 잘 일치하고 있으며, 더불어 두 결과 사이의 대응성도 만족스러우므로 이 수치해석결과의 타당성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

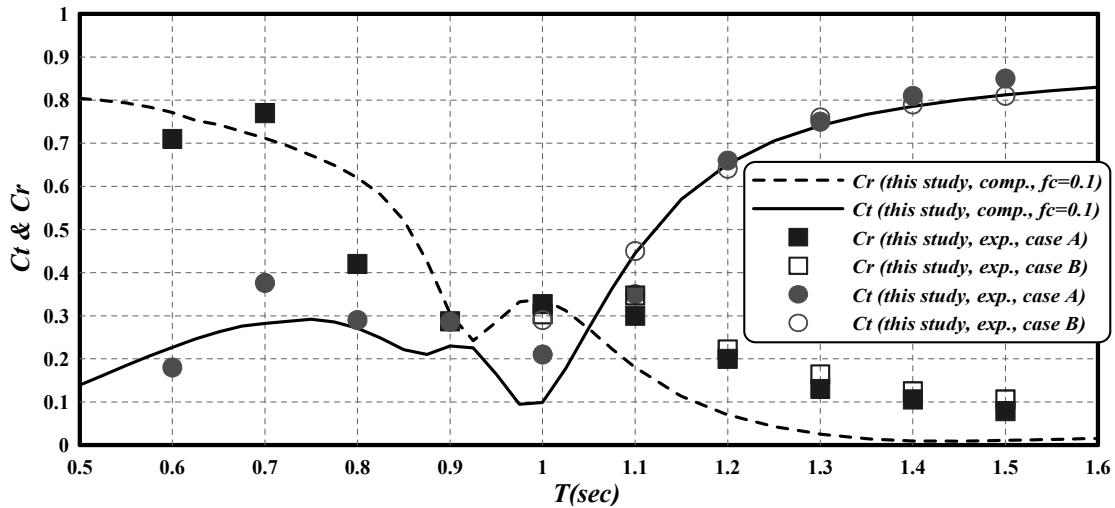


Fig. 3.25. 반사율과 전달율(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

#### (c) 에너지감쇠

Fig. 3.26은 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 주기가 증가하면서 에너지감쇠율은 커지고, 주기 1.0sec 부근에서 최대의 에너지감쇠율 90% 정도를 나타내며, 이후에는 에너지감쇠율이 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며,  $T \leq 0.8\text{sec}$ 의 단주기측에서 약간의 차이를 나타내지만 두 값의 대응성이 좋다는 것을 알 수 있다. 여기서, 에너지감쇠율의 최대값은 폰툰형 부소파제 및 수평간격 5cm의 경우에 있어서와 같이 Heave 및 Roll의 고유주기에 상당하며, 이와 같은 결과는 수평간격 5cm의 경우와 같이 Heave 및 Roll의 고유주기에서 근본적으로 부체의 운동이 크게 되기 때문이다.

#### (d) 부체의 운동

수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 수평운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.27에 주어져 있다. 얻어진 수평운동은 전술한 수평간격 5cm인 연직판각형 부소파제의 경우와 유사한 변화과정을 나타내고, 그 값도 거의 동등하다는 것을 알 수 있다. 동일하게 주기의 증가에 따른 무차원수평운동의 변화경향은  $T=1.0\text{sec}$ 에서의 극대치를 제외하면 수치해석결과와 실험치 모두 증가하는 경향을 나타내며, 모든 주

기대에 걸쳐서 두 해석결과가 매우 잘 일치한다. 그리고, 입사파고의 변화에 따른 두 실험해석결과와의 차이에서 부분적으로 비선형성을 나타내지만 수평간격 5cm의 경우와 동일하게 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 수평운동에서의 비선형성의 영향은 매우 적은 것으로 판단된다.

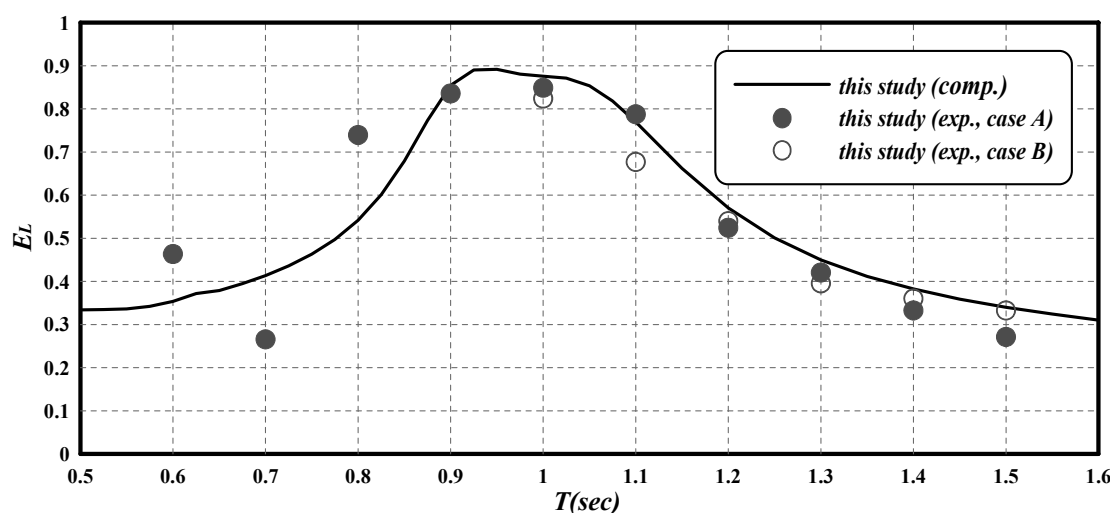


Fig. 3.26. 에너지감쇠율(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

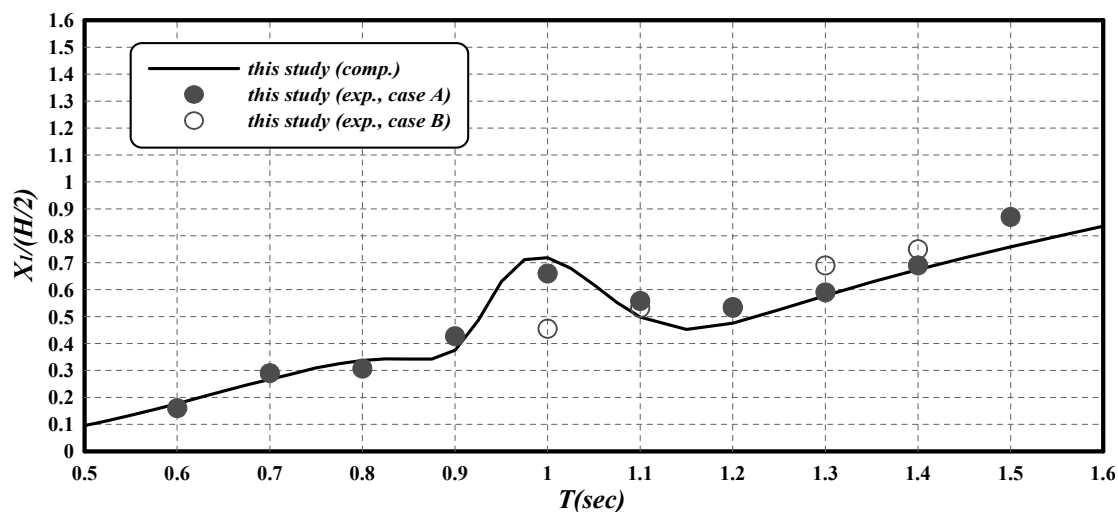


Fig. 3.27. Swaying(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

다음의 Fig. 3.28은 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 연직운동을 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 수치해석결과에서는 주기가 증가함에 따라 무차원연직운동의 최대값이 주어지는  $T=1.0\text{sec}$ 까지는 무차원연직운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에, 수리실험결

과에서는 이와는 상이한 결과를 나타내고 있으며,  $T=1.0\text{sec}$ 의 부근이 아니라  $T=1.35\text{sec}$ 의 부근에서 최대치를 나타내고 있다. 이와 같은 실험결과는 전술한 수평간격 5cm의 경우와 같이 고유주기 근방인  $T=1.0\text{sec}$ 의 부근에서는 부체의 운동이 크게 되고, 이에 수반하여 부체의 상면을 통한 월류로 인하여 부체의 연직운동이 억제되기 때문이며, 동시에 연직운동의 값이 커짐에 따라 Sinker의 저항도 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 전술한 수평간격 5cm의 경우와 비교하면 고유주기대 근방에서 보다 작은 연직운동을 나타낸다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과는 고유주기대 근방에서 결과치를 제외하면 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 미소하므로 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 연직운동에서 비선형성의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

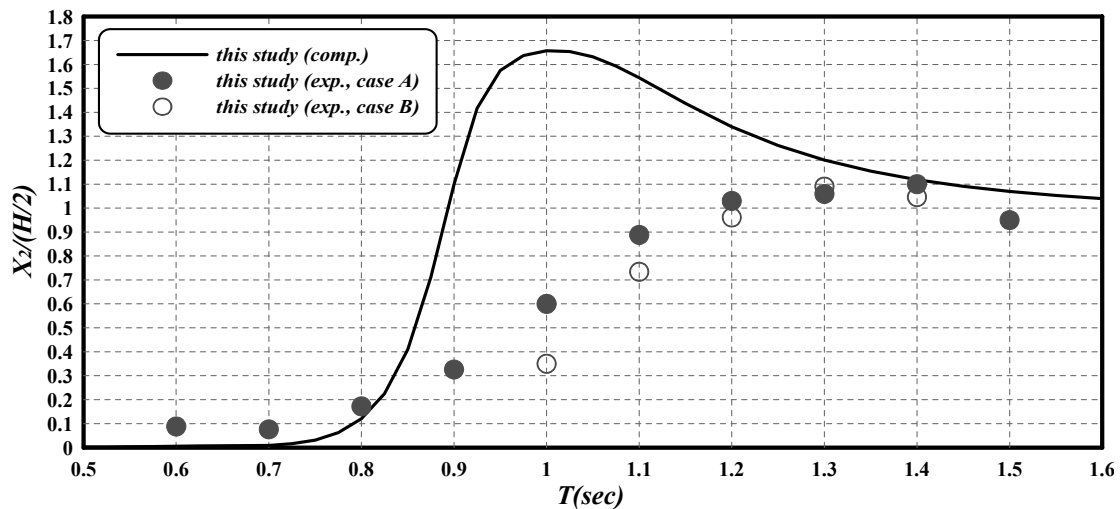


Fig. 3.28. Heaving(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

다음의 Fig. 3.29에 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 회전운동의 결과를 나타낸다. 그림으로부터 주기가 증가함에 따라 무차원회전운동의 최대값이 주어지는  $T=1.03\text{sec}$ 까지는 무차원회전운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 감소하는 경향을 알 수 있다. 여기서, 무차원회전운동의 최대값이 나타나는  $T=1.03\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 회전운동의 고유주기에 대응하는 것을 알 수 있다. 따라서, 연직운동의 경우와 동일하게 회전운동의 고유주기에서 최대의 회전운동을 나타내고, 좌우의 주기대에서 운동량이 감소하여 가는 경향을 나타낸다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과는 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 변화에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지

않으므로 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 회전운동에서 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다. 전술한 수평간격 5cm의 경우와 비교하면 동일한 변화과정과 운동량을 나타내는 것을 알 수 있다. 전술한 폰툰형 부소파제의 경우와 비교하면 운동량의 최대치가 나타나는 위치가 보다 장주기측으로 이동되어 있고, 또한 그 값도 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 회전운동의 고유주기가 보다 장주기측으로 이동되었기 때문이다.

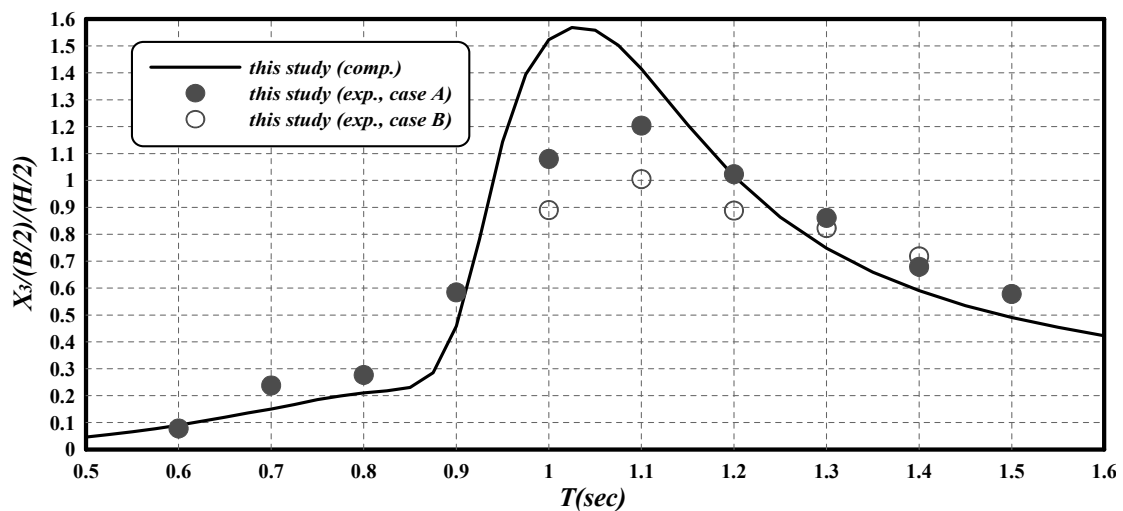


Fig. 3.29. Rolling(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

#### (e) 표류거리

다음의 Fig. 3.30은 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제에 있어서 표류력에 의한 표류거리를 나타낸 결과이다. 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.25의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.30의 무차원표류거리의 변화과정은 반사율에서 극대치 및 극소치의 주변값을 제외하면 주기의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

#### (f) 계류라인의 장력

Fig. 3.31에 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 경우에 주기의 변화에 따른 무차원장력의 변화를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 동일한 주기에서 입사파고의 차이에 따라 그 결과치의 차이가 다소 크게 나타나며, 입사파고가 클수록 계류장력도 크게 되는 경향은 전술한 폰툰형 부소파제 및 수평간격 5cm의 경우와 동일하다. 최대장력은 부소파제 중량의 대략 10%정도에 달하며, 전술한 수평간격 5cm의 경우보다 작은 값을 나타낸다. 여기서, 입사파고가 작은 경우에 대한 장력은 계류라인에 인발되는 힘이 거의 작용하지 않기 때문에 Catenary로 되는 계류라인의 길이의 시간

변화에 따른 계류라인의 변동중량성분이 대부분을 차지하지만, 이는 부소파제 중량의 4%에 해당하는 미소한 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

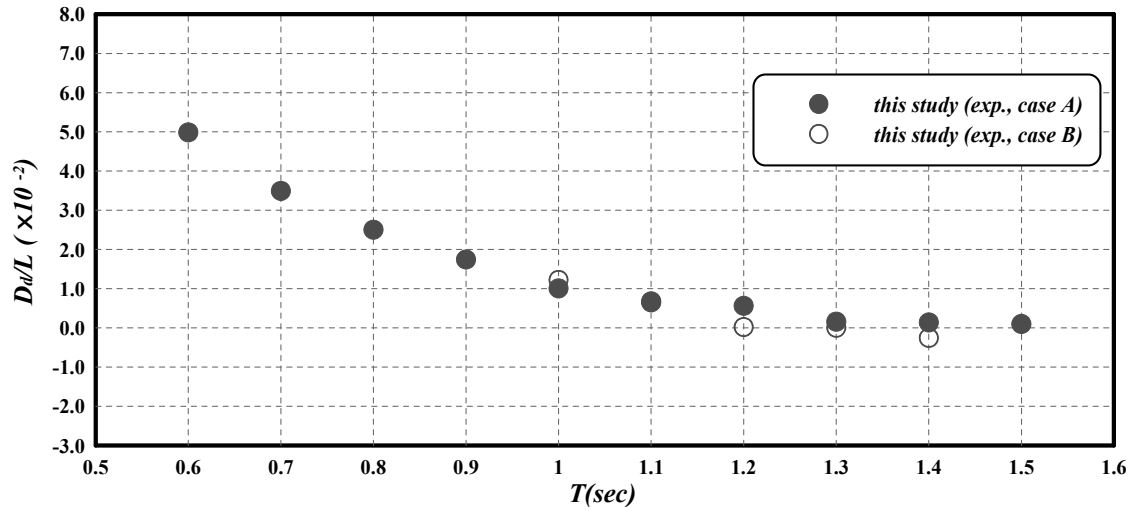


Fig. 3.30. 표류거리(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

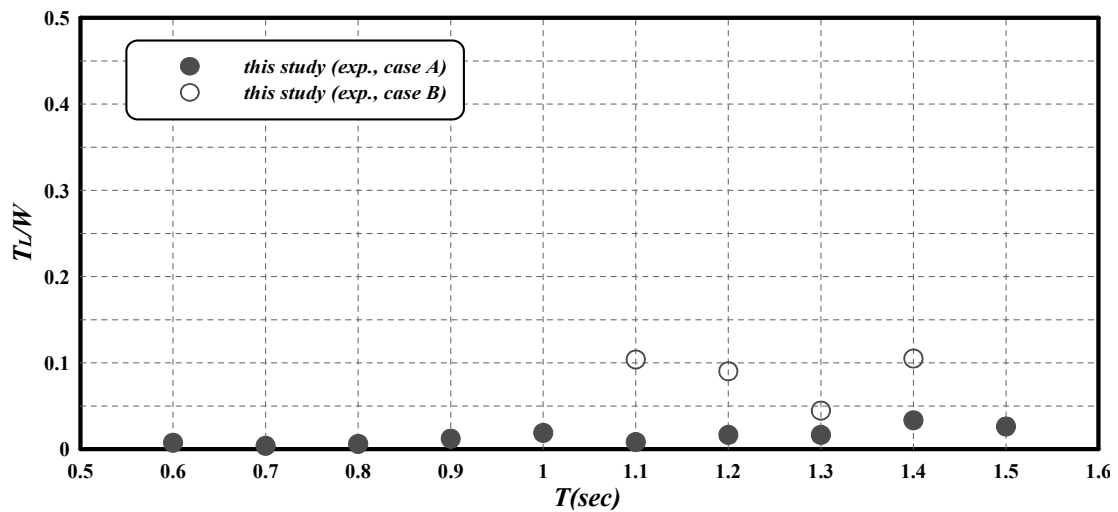


Fig. 3.31. 계류라인의 장력(FBVLP, 수평간격 : 10cm).

### (3) 수평간격이 15cm인 경우

#### (a) 고유주기

수평간격이 15cm인 연직판각형 부소파제의 고유주기를 측정한 결과가 Fig. 3.32에 주어져 있다. 결과에 의하면 폰툰형 부소파제의 경우보다는 길고 수평간격이 5, 10cm의 경우와는 거의 동일한 회전운동의 고유주기  $T_n = 1.0\text{sec}$ , 연직운동의 고유주기  $T_n = 1.02\text{sec}$ 를 산출할 수 있고, 두 운동에 있어서 고유주기의 차이는 매우 작다. 따

라서, 이의 값들로부터 입사파랑의 주기  $T=1.0\text{sec}$ 의 근방에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 매우 크게 될 것이고, 동시에 전달율이 매우 작아질 것으로 판단된다.

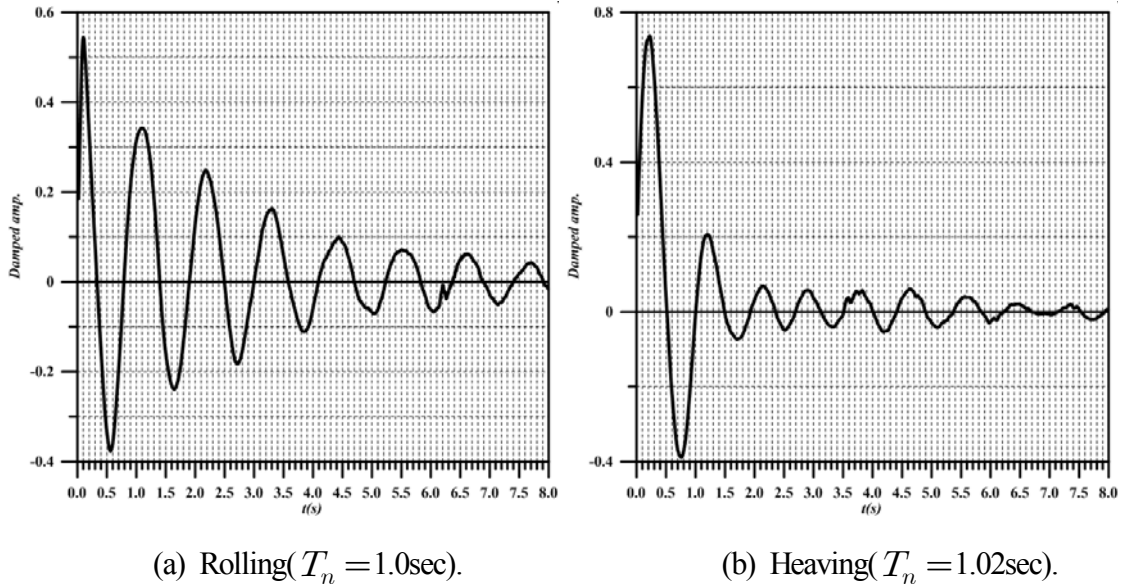


Fig. 3.32. 고유주기(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

#### (b) 파랑제어

수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 Fig. 3.33에 나타낸다. 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화를 살펴보면 주기가 증가함에 따라  $T \approx 1.0\text{sec}$ 에서 변곡점이 발생하는 것을 제외하면 반사율은 감소하지만, 전달율의 경우에는 부체의 고유주기와 대략적으로 일치하는  $T \approx 1.02\text{sec}$ 에서 극소치  $C_t \approx 0.2$ 를 나타내고 이후에 전달율이 증가하는 현상을 나타내며,  $C_t > 0.8$ 인 대략  $T > 1.4\text{sec}$ 의 영역에서는 대부분의 파랑에너지가 부소파제의 배후로 전달되는 것을 알 수 있다.

여기서, 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제의 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 1.15\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어지며, 현지파랑으로 환산하면 5.14sec보다 작은 주기의 파랑에 대해서 효과적인 파랑제어기능을 갖는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 상당히 개선된 결과를 나타내며, 수평간격 5, 10cm와 비교하면 파랑제어기능이 약간 장주기측으로 향상되어 있고, 단주기측에서는 훨씬 작은 전달율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 파랑제어라는 관점에서는 수평간격 15cm경우가 단주기 및 장주기측에서 가장 작은 전달율을 나타내므로 가장 탁월하다는 것을 알 수 있다. 그리고, 실제로 원전어항에 적용되는 부소파제의 전달율을 살펴보면  $C_t < 0.5$ 의 주기영역은  $T < 4.3\text{sec}$ (모델에서

0.96sec)이고,  $C_t > 0.8$ 의 주기영역은  $T > 5.4\text{sec}$ (모델에서 1.2sec)로 주어진다. 이의 결과와 수평간격 15cm의 연직판각형 부소파제에 의한 파랑제어효과를 비교하면 이 부소파제의 경우가 훨씬 탁월하다는 것을 알 수 있다.

다음으로 수치해석결과의 타당성을 살펴보면 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화 경향은 실험치와 매우 잘 일치하고 있으며, 더불어 두 결과치의 사이에 오차도 거의 없으므로 이 수치해석결과의 타당성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

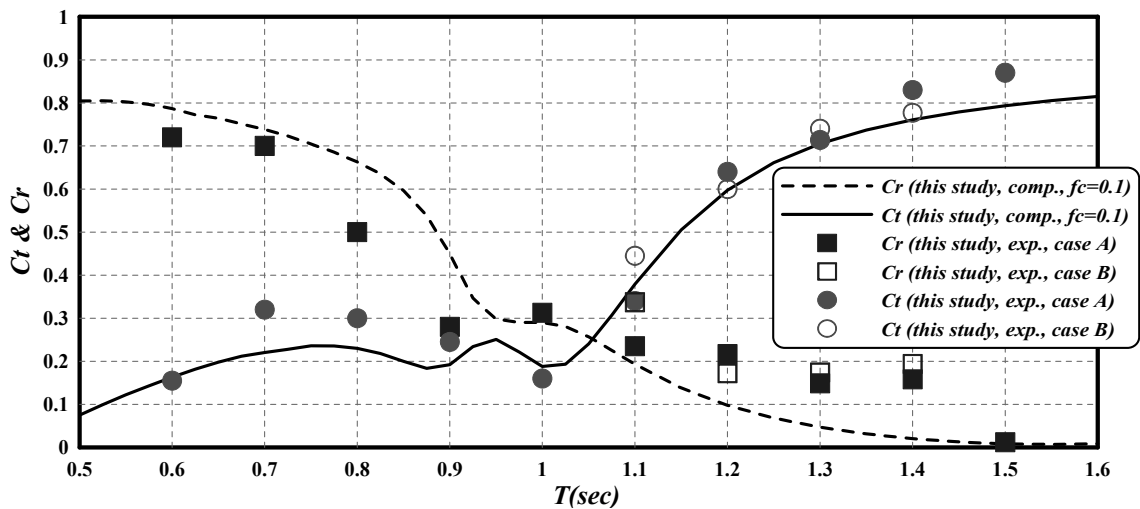


Fig. 3.33. 반사율과 전달율(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

#### (c) 에너지감쇠

Fig. 3.34는 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 결과에 의하면 주기가 증가하면서 에너지감쇠율은 커지고, 주기 1.0sec 부근에서 최대의 에너지감쇠율 90% 정도를 나타내며, 이후에는 에너지감쇠율이 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 대응성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 여기서, 에너지감쇠율이 최대로 나타나는 지점은 전술한 폰툰형 부소파제 및 수평간격 5, 10cm의 경우와 같이 부체의 운동이 가장 커지는 Heave 및 Roll의 고유주기에 대응된다.

#### (d) 부체의 운동

수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 수평운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.35에 주어져 있다. 결과를 살펴보면 수평운동은 전술한 수평간격 5, 10cm인 연직판각형 부소파제의 경우와 유사한 변화과정을 나타내고, 그 값은 약간 작다는 것을 알 수 있다.

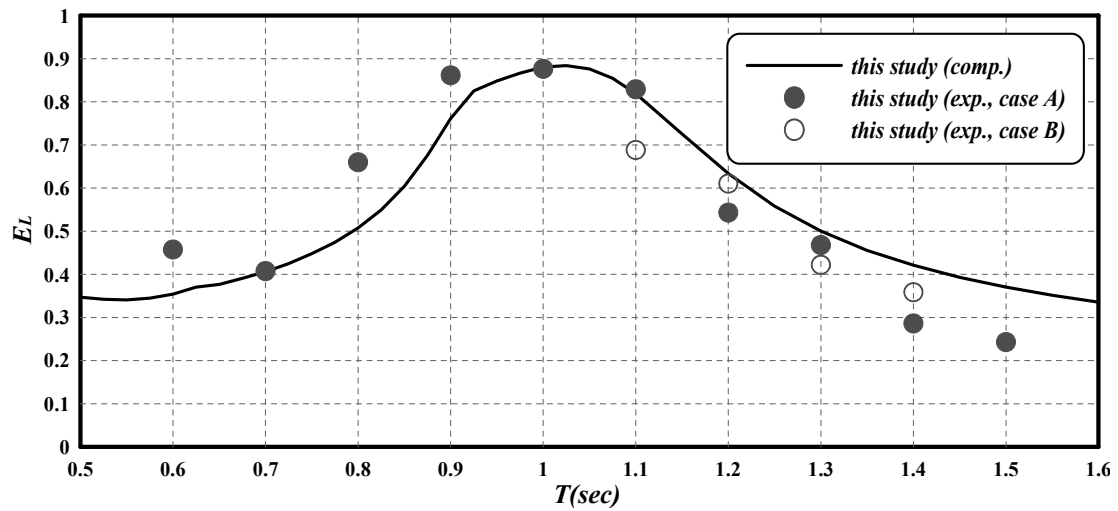


Fig. 3.34. 에너지감쇠율(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

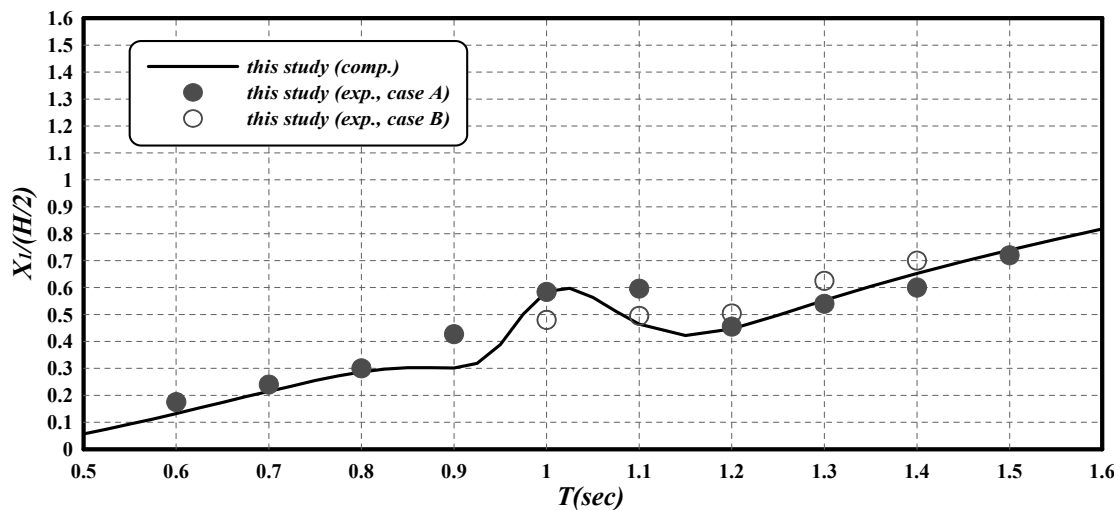


Fig. 3.35. Swaying(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

다음의 Fig. 3.36는 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 연직운동의 결과를 나타낸다. 수치해석결과는 전술한 수평간격 5, 10cm의 경우와 비교하면 고유주기대에서 보다 작은 연직운동을 나타낸다. 실험결과와 수치해석결과는 고유주기대 근방에서 결과치를 제외하면 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 전술한 수평간격 5, 10cm의 경우와 같이 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제의 연직운동에서도 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다.

수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제에 대한 重心의 회전운동을 Fig. 3.37에 나타낸다. 전술한 수평간격 5, 10cm의 경우와 동일한 변화과정을 갖지만 운동량은 제일 작은 것으로 나타난다. 또한, 전술한 폰툰형 부소파제의 경우와 비교하면 운동량의



최대치가 나타나는 위치가 보다 장주기측으로 이동되어 있고 그 값도 크다.

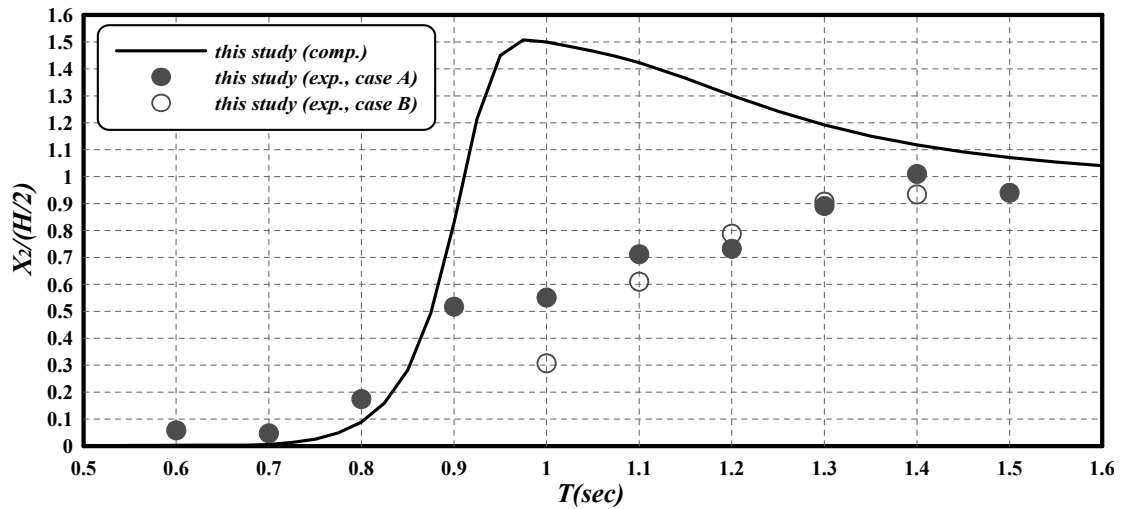


Fig. 3.36. Heaving(FBVLP, 수평간격: 15cm).

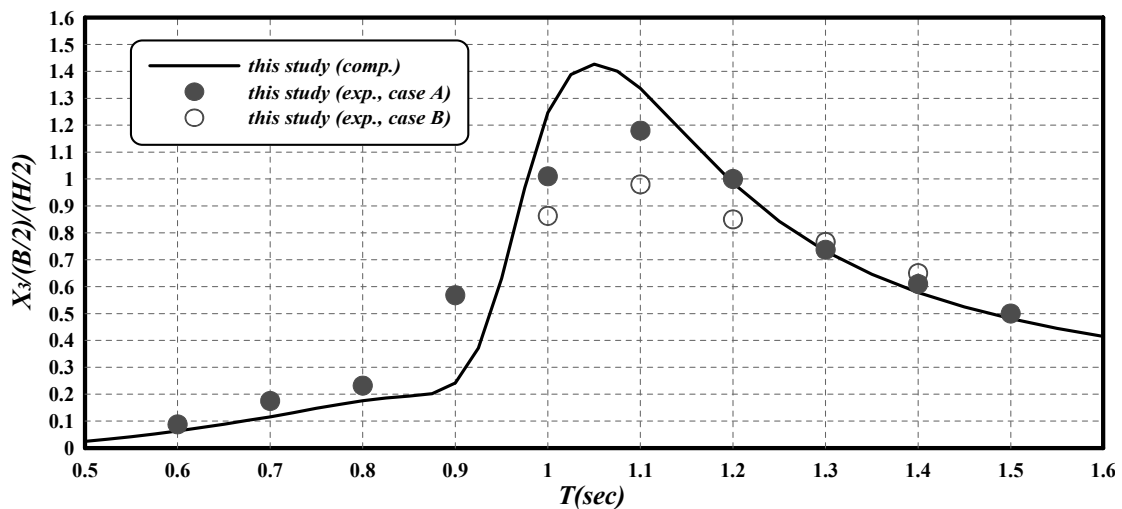


Fig. 3.37. Rolling(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

#### (e) 표류거리

다음의 Fig. 3.38은 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제에 있어서 표류력에 의한 표류거리를 나타낸 결과이다. 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제의 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.33의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.38의 무차원표류거리의 변화과정은 고유주기대를 포함하여 주기의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

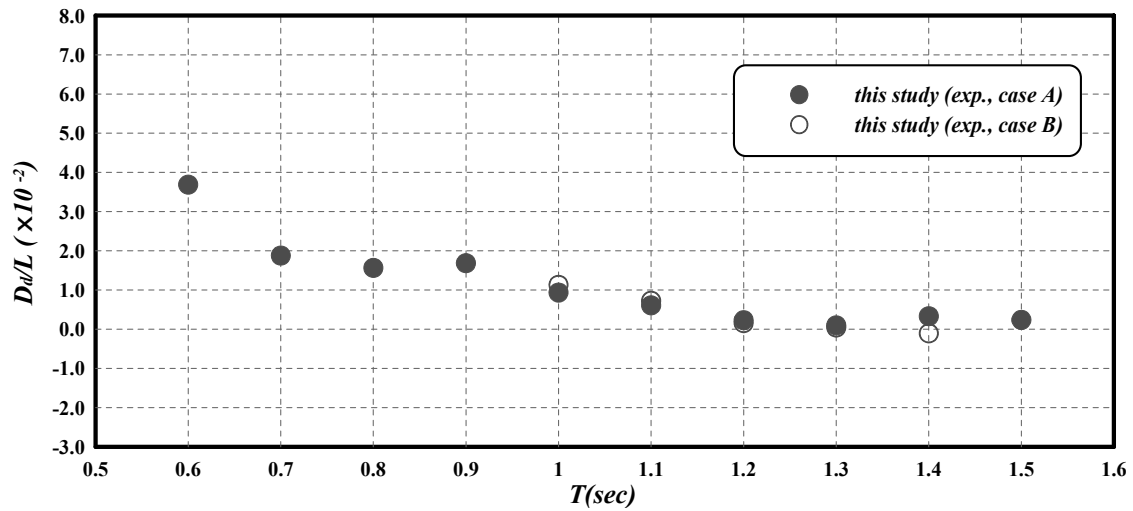


Fig. 3.38. 표류거리(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

(f) 계류라인의 장력

Fig. 3.39에 수평간격 15cm인 연직판각형 부소파제의 경우에 주기의 변화에 따른 무차원장력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 전술한 각 부소파제의 경우와 같이 동일한 주기에서 입사파고의 차이에 따라 그 결과치의 차이는 매우 크게 나타나며, 입사파고가 클수록 계류장력도 크게 된다는 것을 알 수 있다. 여기서, 최대장력은 부소파제 중량의 대략 18% 정도에 달하며, 전술한 수평간격 10cm의 경우보다는 크고, 5cm의 경우와는 대등한 값을 나타낸다. 여기서, 수평간격 10cm인 연직판각형 부소파제의 경우와 같이 입사파고가 작은 경우에 대한 장력은 계류라인에 인발되는 힘이 거의 작용하지 않기 때문에 Catenary로 되는 계류라인의 길이의 시간변화에 따른 계

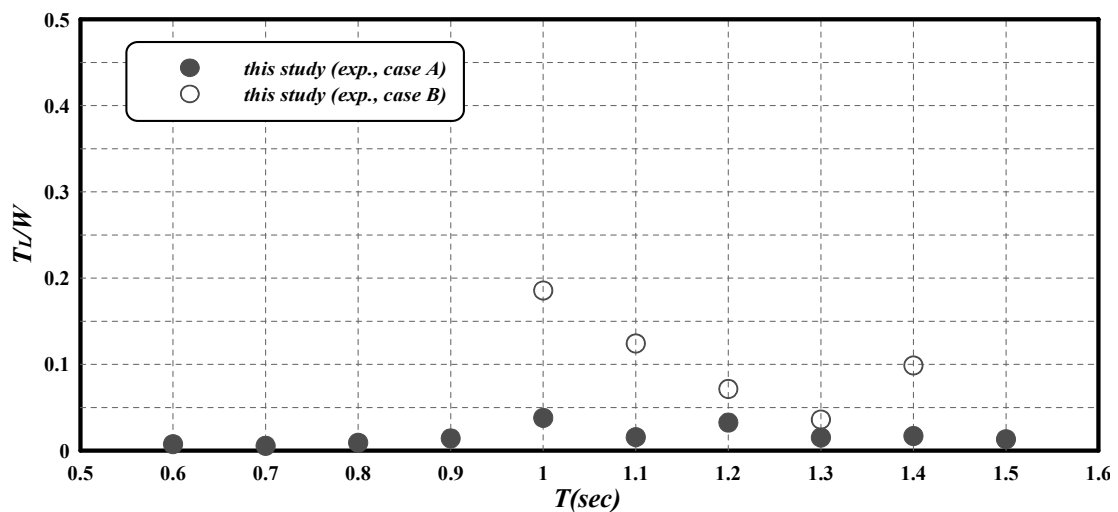


Fig. 3.39. 계류라인의 장력(FBVLP, 수평간격 : 15cm).

류라인의 변동중량성분이 대부분을 차지하지만, 이는 부소파제 중량의 4%에 해당하는 미소한 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

### 3.4.5 복합판형 부소파제의 실험결과 및 고찰

Fig. 3.5 및 Photo 3.4에서 제시된 복합판형 부소파제는 원전어항에 건설되는 연직판각형 부소파제의 파랑제어기능을 장주기에서 향상시키려고 고안한 신형식 부소파제이다. 이 부소파제는 폰툰형 부소파제를 기본형으로 하여, 연직판각형 부소파제가 갖는 연직판을 적용하여 피스톤모드의 공진을 발생시키고, 연직판과 일체가 되어 있는 하부의 수평판으로 부소파제의 전체적인 폭을 넓혀 보다 장주기측에서 파랑제어를 도모하고자 하였으며, 동시에 양 수평판의 전면에서 강제적인 와류를 생성시켜 파랑에너지의 감쇠를 유도하고자 하였다.

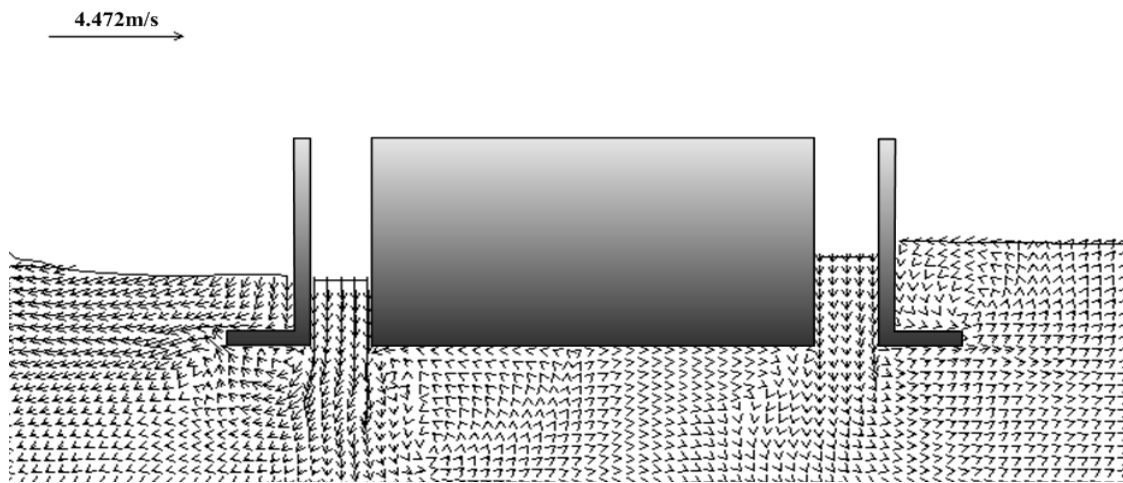
이에 대하여, CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究Center, 2001)로부터 주기의 변화에 따른 고정된 복합판형 부소파제(Fig. 3.5에서와 같이 본체와 연직판과의 수평거리는 5cm, 수심은 75cm, 흘수는 7.3cm이다)의 주변에서 유속의 공간분포를 나타낸 결과가 Fig. 3.40~3.42에 제시되어 있다. 결과를 살펴보면 모든 경우에 전면 수평판 우각부의 위측에서는 강한 시계방향의 와동현상이, 아래측에서는 강한 반시계방향의 와동현상이 일어나며, 이러한 와동으로 인하여 파랑에너지의 감쇠가 크게 될 것으로 판단된다. 또한, 연직판과 폰툰 사이의 유수실에서 피스톤모드의 파랑공진에 의한 큰 수위변동을 볼 수 있고, 이로 인하여 연직판의 하부에서 큰渦가 발생하여 또한 파랑에너지의 감쇠로 귀착될 것이다. 여기서, 주기의 변화에 따른 와동현상의 크기를 살펴보면 주기가 길어질수록 구조물의 주변에서 와동현상은 강하게 발생하는 것을 알 수 있고, 전달측의 연직판 하부에서도 결코 무시할 수 없는 큰 와동이 생성된다. 이와 같은 와동 등으로 인한 파랑에너지의 감쇠를 수치적으로 나타내기 위하여 구조물 전후에서 반사율과 전달율을 산정하면 주기 0.8sec의 경우에는  $C_r=0.80$ ,  $C_t=0.14$ ,  $E_L=0.31$  ; 주기 1.0sec의 경우에는  $C_r=0.68$ ,  $C_t=0.28$ ,  $E_L=0.46$  ; 주기 1.2sec의 경우에는  $C_r=0.58$ ,  $C_t=0.50$ ,  $E_L=0.41$ 의 값을 얻을 수 있다. 따라서, 고정된 복합판형 부소파제에 있어서 파랑에너지감쇠율은 주기에 따라 다소 상이하지만 0.4정도로 된다.

이상에서 검토된 파랑에너지의 감쇠에 대한 메커니즘은 구조물의 운동시에는 발산파의 발생 등과 같은 요소로 인하여 전술한 결과와는 다르게 나타날 수도 있겠지만, 기본적으로 부소파제에 의한 파랑제어는 고정시의 반사파·전달파와 운동시의 발산파의 위상결합으로 나타나는 현상임을 고려한다면 전술한 파랑에너지의 요소가 포함

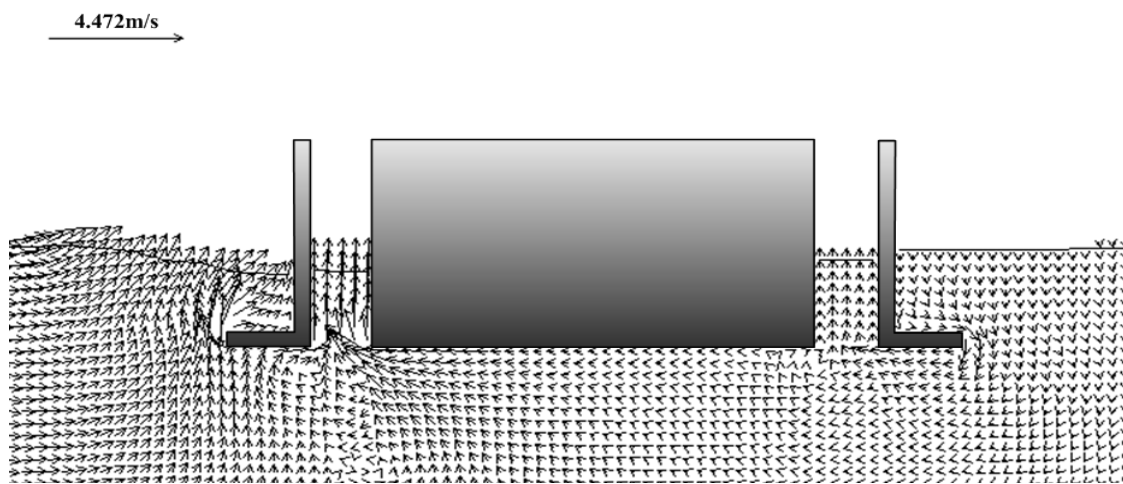
된다. 그리고, 부소파제의 형상에 따라 파랑에너지의 감쇠에 대한 메커니즘도 상이하겠지만 이 연구에서 제시된 모형 중 복합판형 부소파제의 경우가 연직판과 수평판에 의한 파랑에너지의 감쇠 메커니즘을 모두 확인 할 수 있으므로, 유속의 공간분포에 대한 수치해석은 복합판형 부소파제에 대해서만 수행하였다.

이하에서는 복합판형 부소파제의 파랑에너지의 감쇠를 포함하여, 파랑제어기능, 운동변위 및 계류라인의 장력 등을 수리실험을 실시하여 해석하고, 수치해석결과와 비교·검토한다. 수리실험에서는 본체와 연직판과의 수평거리가 파랑변형 및 부소파제의 운동 등에 미치는 영향을 검토하기 위하여 본체 하부에 부착된 수평판의 길이를 5cm로 고정하고, 본체와 연직판의 수평간격을 5, 10, 15cm로 각각 변화시켜 실험을 수행하였다. 다음의 Photo 3.13에 수리실험상황을 나타낸다.

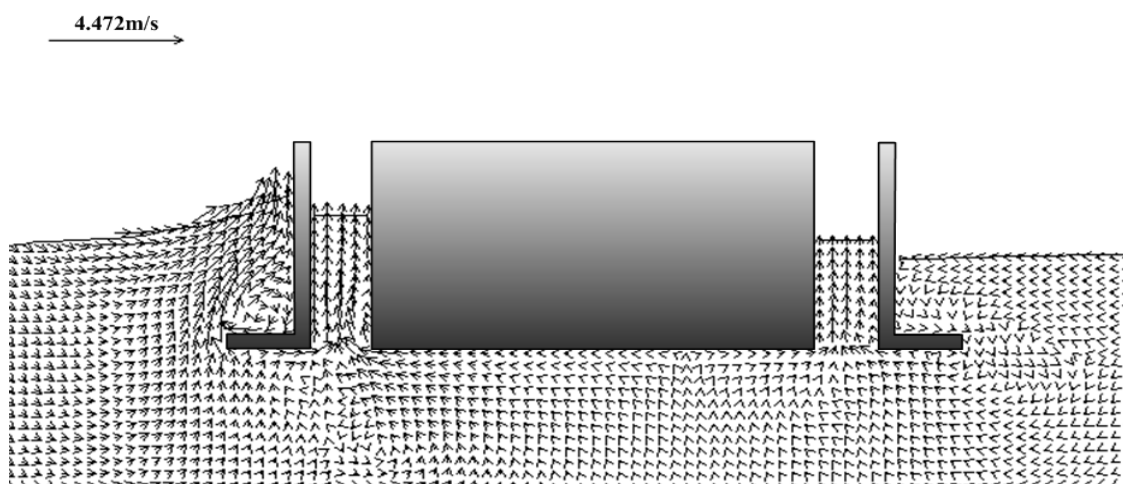
다음으로, 연직판각형 부소파제의 경우와 같이 복합판형 부소파제도 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 형상이 복잡하고 폰툰 전후에 부착된 연직판 및 연직판 하부에 부착된 수평판의 영향으로 파랑에너지의 감쇠가 폰툰형 부소파제의 경우보다 다소 클 것으로 예상되므로, 에너지감쇠율  $f_c$ 의 값을 조정하여 수치해석을 실시하고, 그 결과를 실험치와 비교하여 가장 합당한 것으로  $f_c=0.12$ 의 값을 산출할 수 있었다. 따라서, 이하에서 제시하는 복합판형 부소파제의 모든 수치해석결과(파랑변형, 각 운동량 및 계류라인의 장력)에 에너지감쇠율로  $f_c=0.12$ 의 값을 적용하였다.



(a)  $t=59.918\text{sec}$ .

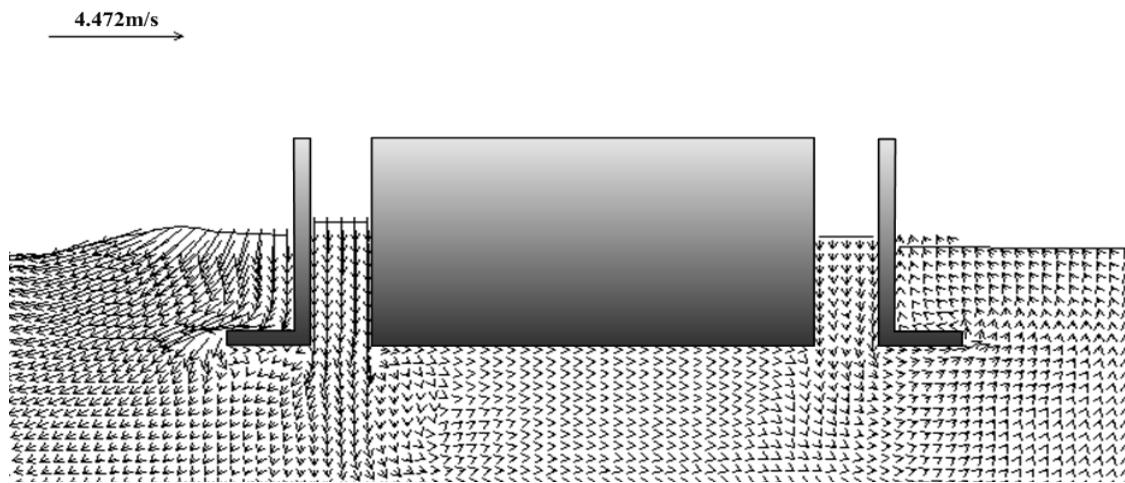


(b)  $t=60.526\text{sec}$ .

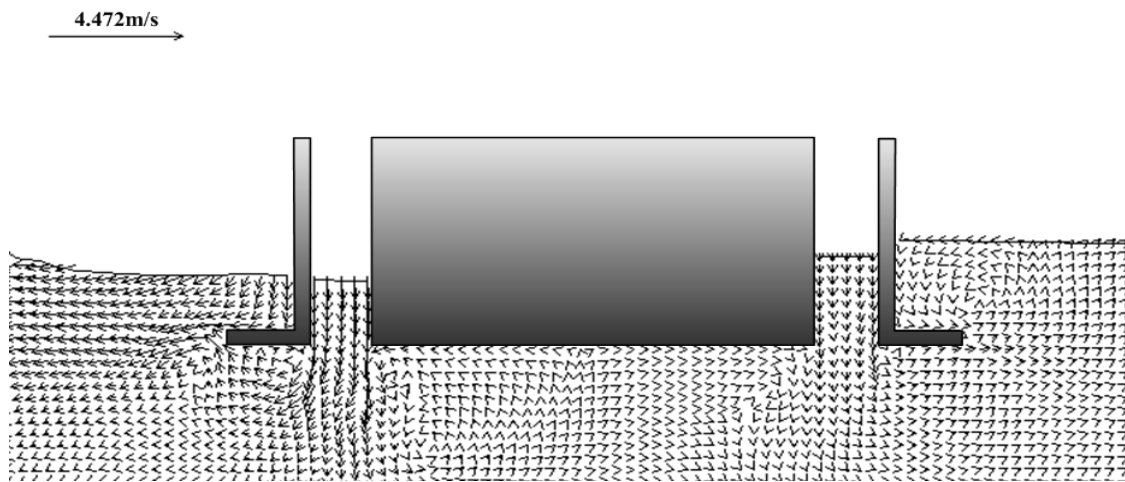


(c)  $t=61.724\text{sec}$ .

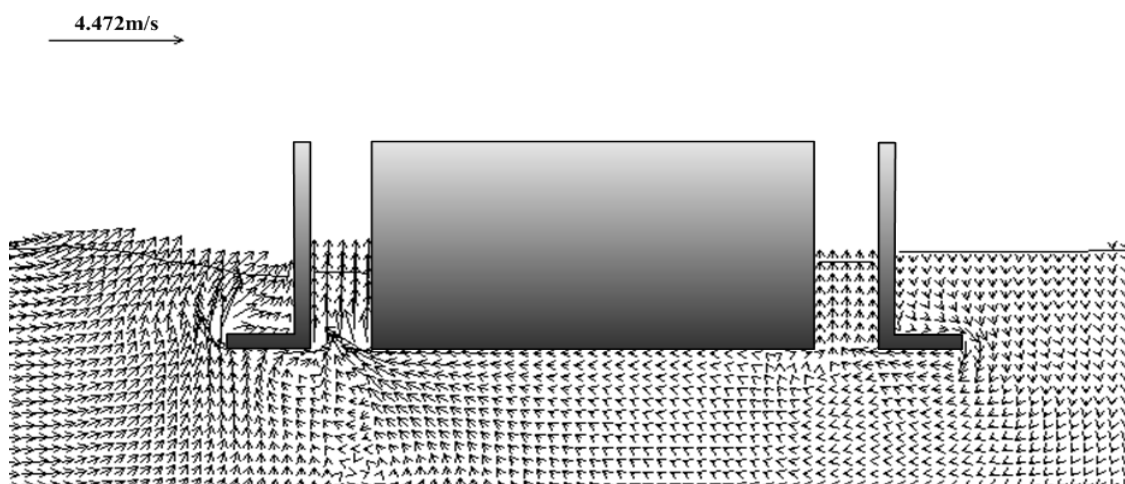
Fig. 3.40. 유속벡터의 공간분포(FBCPT,  $H=4.0\text{cm}$ ,  $T=0.8\text{sec}$ )(계속).



(d)  $t=62.614\text{sec}$ .

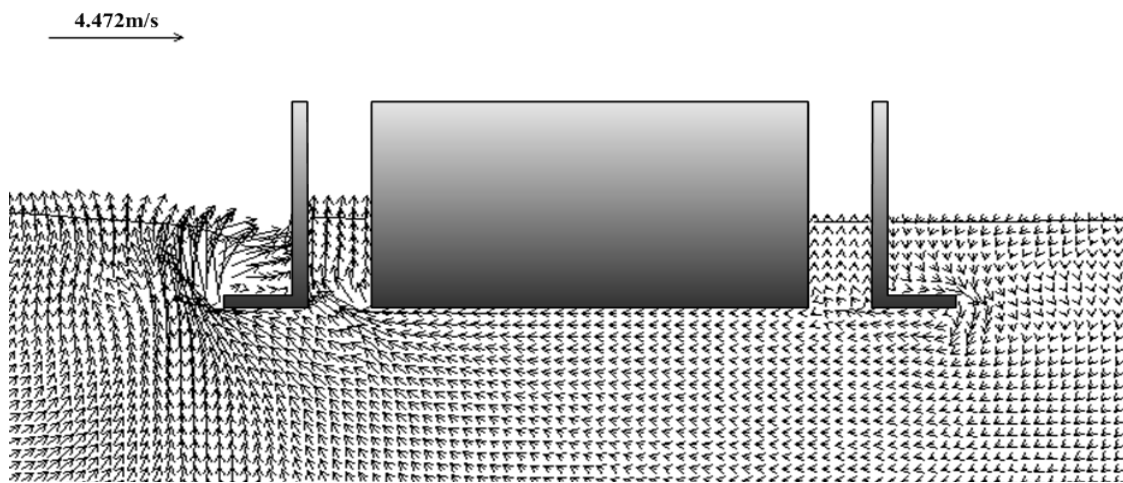


(e)  $t=63.500\text{sec}$ .

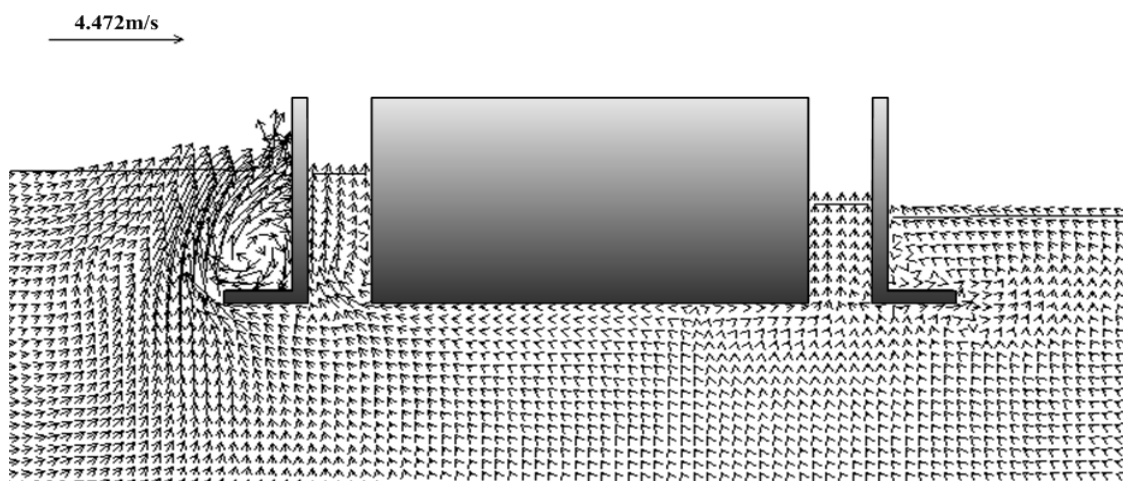


(f)  $t=64.403\text{sec}$ .

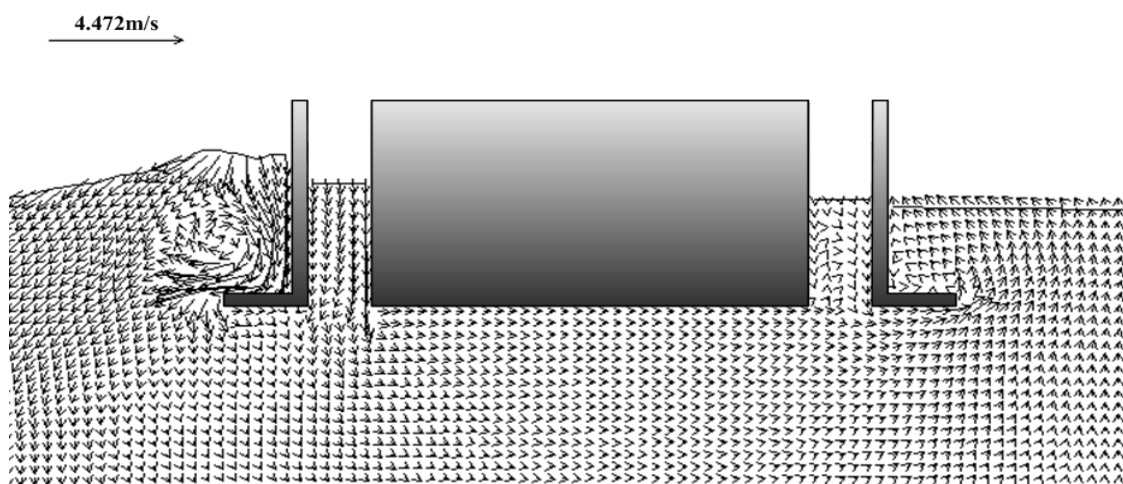
Fig. 3.40. 유속벡터의 공간분포(FBCPT,  $H=4.0\text{cm}$ ,  $T=0.8\text{sec}$ ).



(a)  $t=102.859\text{sec}$ .

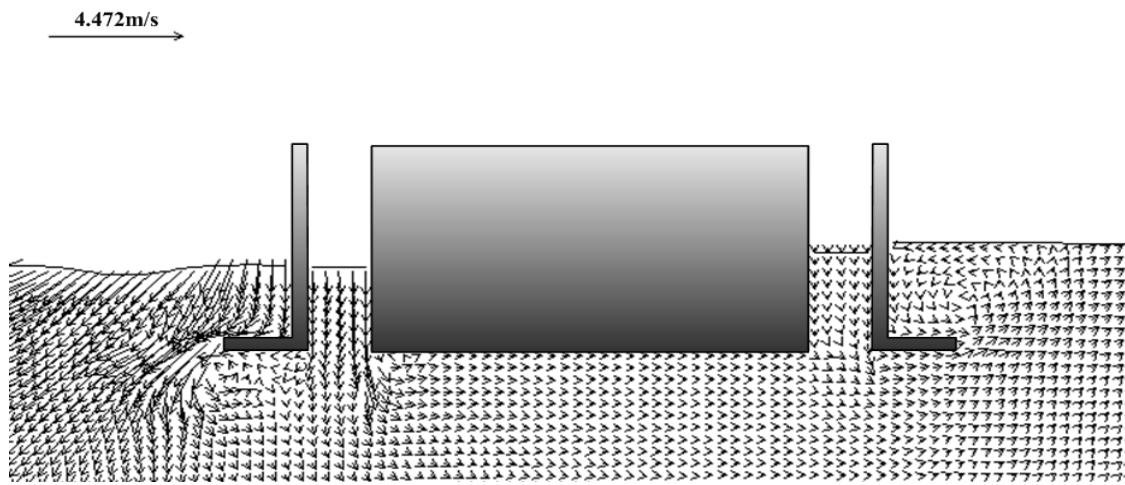


(b)  $t=103.754\text{sec}$ .

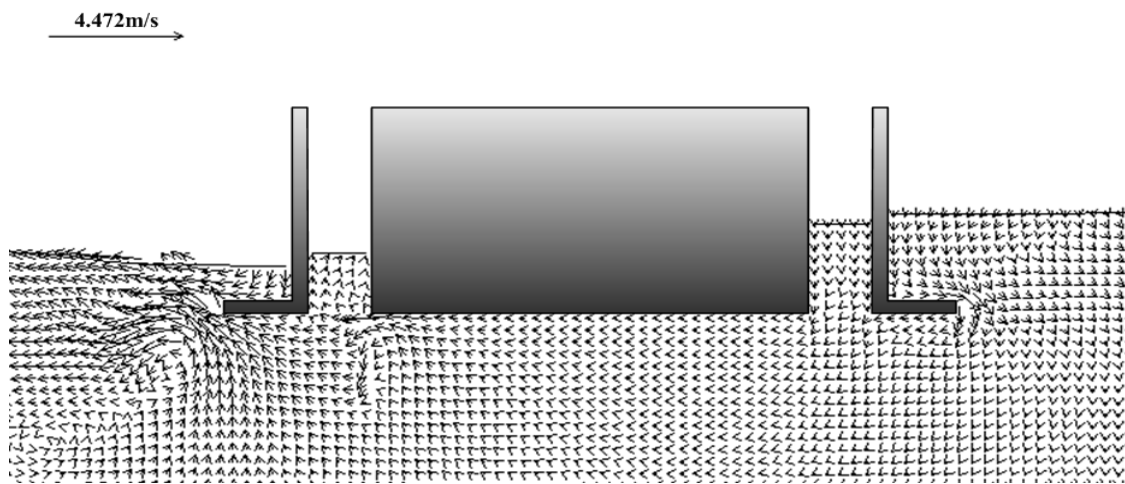


(c)  $t=104.652\text{sec}$ .

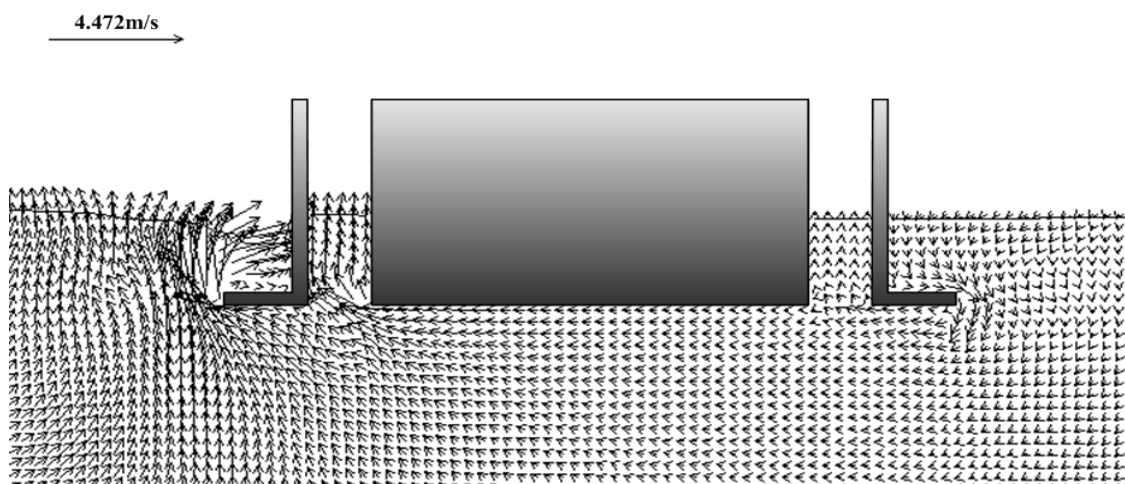
Fig. 3.41. 유속벡터의 공간분포(FBCPT,  $H=4.0\text{cm}$ ,  $T=1.0\text{sec}$ )(계속).



(d)  $t = 105.538 \text{ sec}$ .



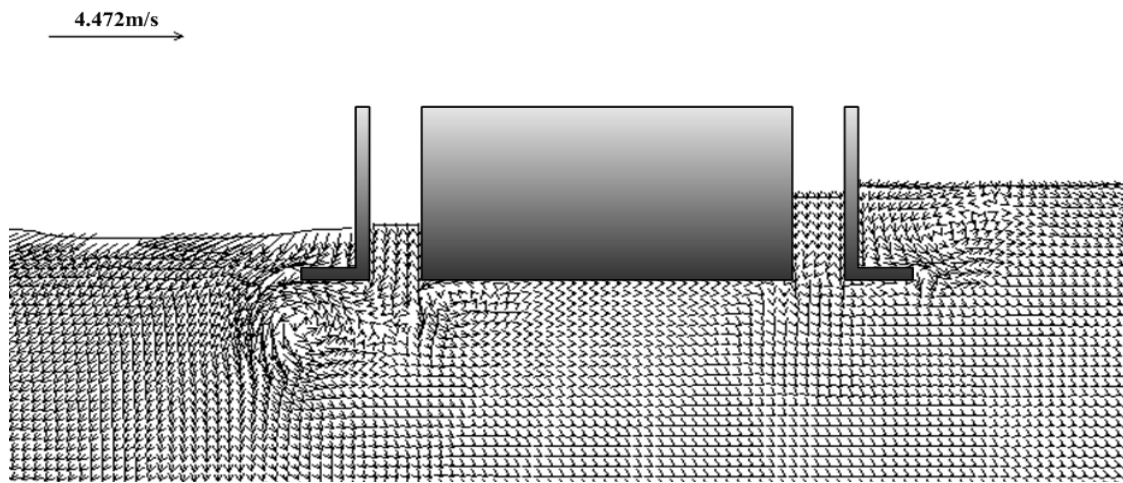
(e)  $t = 106.437 \text{ sec}$ .



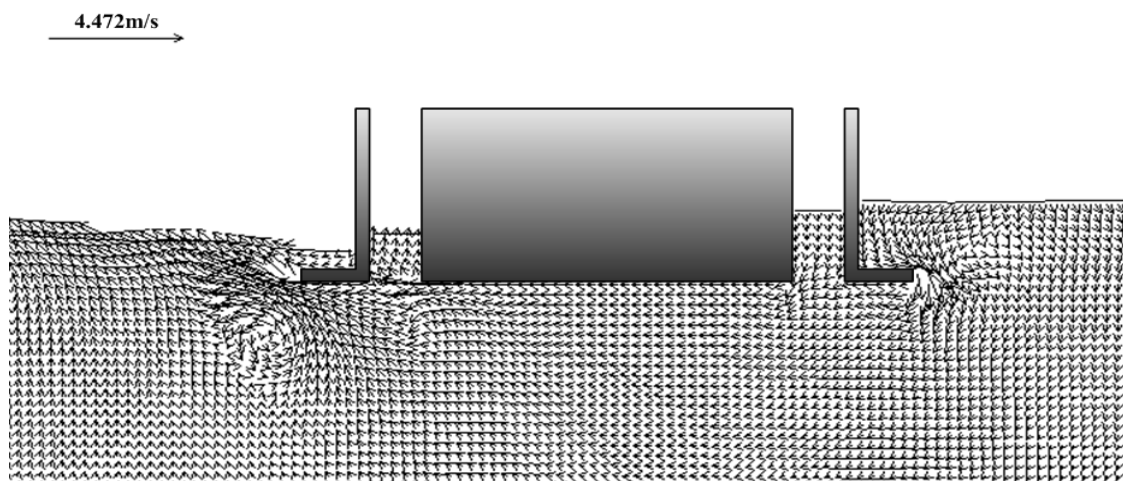
(f)  $t = 107.331 \text{ sec}$ .

Fig. 3.41. 유속벡터의 공간분포(FBCPT,  $H = 4.0 \text{ cm}$ ,  $T = 1.0 \text{ sec}$ ).

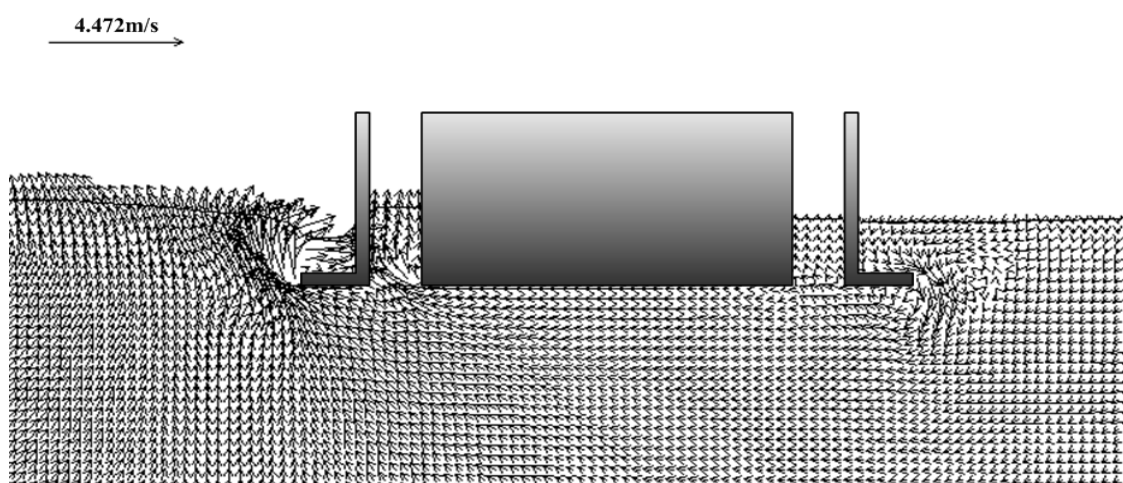




(a)  $t=116.217\text{sec.}$

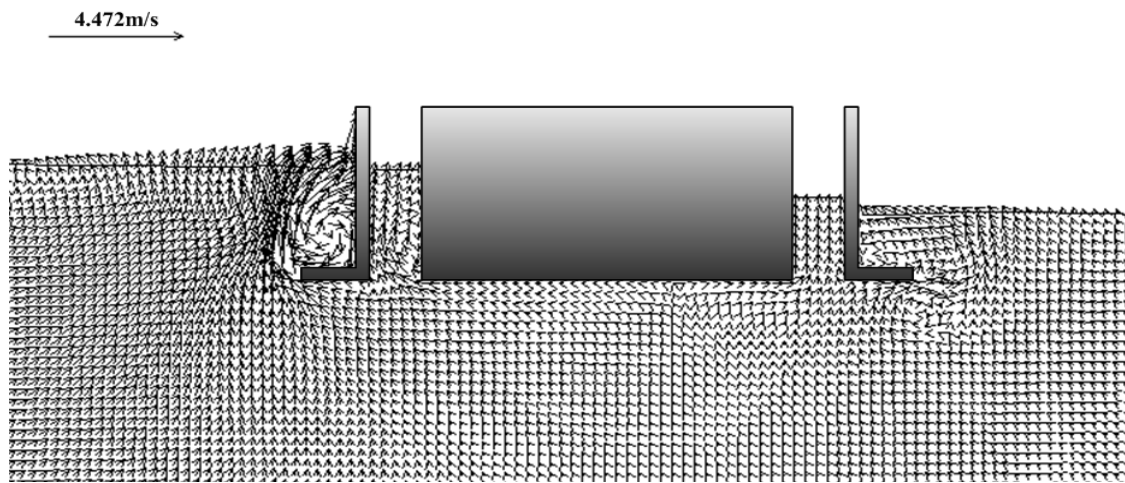


(b)  $t=117.165\text{sec.}$

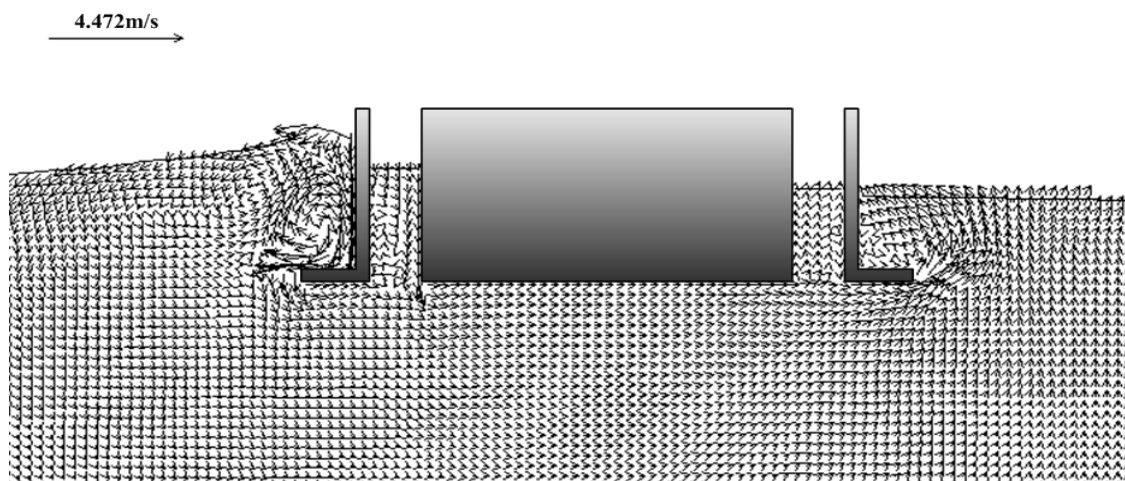


(c)  $t=118.060\text{sec.}$

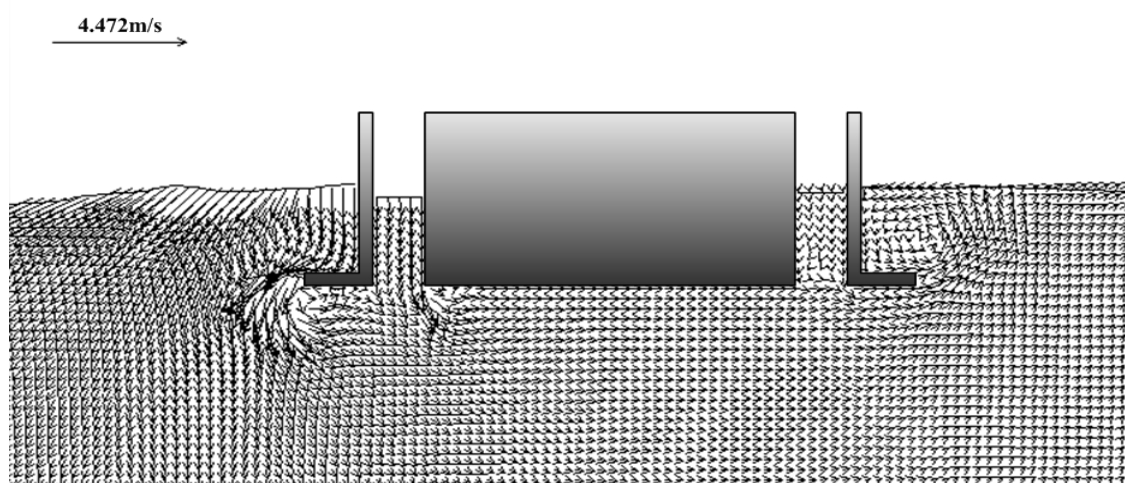
Fig. 3.42. 유속벡터의 공간분포(FBCPT,  $H=4.0\text{cm}$ ,  $T=1.2\text{sec}$ )(계속).



(d)  $t=118.950\text{sec.}$



(e)  $t=119.858\text{sec.}$



(f)  $t=120.748\text{sec.}$

Fig. 3.42. 유속벡터의 공간분포(FBCPT,  $H=4.0\text{cm}$ ,  $T=1.2\text{sec}$ ).



Photo 3.13. FBCPT의 실험상황.

### (1) 수평간격이 5cm인 경우

#### (a) 고유주기

수평간격 5cm인 복합판형 부소파제의 고유주기를 측정한 결과가 Fig. 3.43에 주어  
져 있다. 결과에 의하면 복합판형 부소파제의 경우는 두 주기성분의 고유주기를 가지  
는 것을 알 수 있다. 이의 결과는 연직판의 하부에 부착된 수평판의 영향으로 판단된  
다. 짧은 주기의 경우에 회전운동이  $T_n = 0.68\text{sec}$ , 연직운동이  $T_n = 0.76\text{sec}$ 이고, 긴  
주기의 경우에 회전운동이  $T_n = 1.27\text{sec}$ , 연직운동이  $T_n = 1.22\text{sec}$ 를 갖는다. 두 운동  
에 있어서 단주기 및 장주기의 고유주기에서 차이는 매우 작다. 따라서, 이의 값들로

부터 입사파랑의 주기  $T \approx 0.7\text{sec}$  및  $1.25\text{sec}$ 의 근방에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 매우 크게 될 것이고, 동시에 전달율이 매우 작아질 것으로 판단된다.

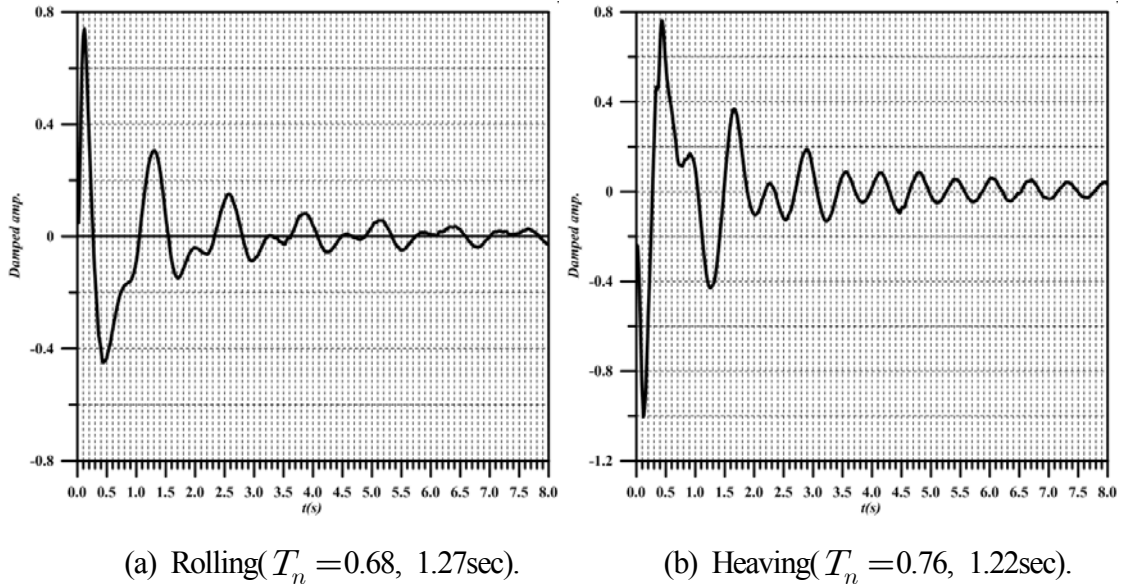


Fig. 3.43. 고유주기(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

#### (b) 파랑제어

수평간격 5cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 나타낸 결과가 Fig. 3.44에 주어져 있다. 주기의 변화에 따른 파랑변형의 결과를 살펴보면 반사율의 경우에 주기가 증가함에 따라  $T=0.64\text{sec}$ 까지는 감소하고,  $T=0.64\text{sec}$ 에서 극소치를 나타낸 후에 상승하면서  $T=0.8\text{sec}$ 에서 극대치를 나타낸 후에는 감소하는 경향을 나타낸다. 전달율의 경우에는  $T=0.58\text{sec}$ 까지는 증가하고  $T=0.58\text{sec}$ 에서 극대치를 나타낸 후에는 감소하며,  $T=0.67\text{sec}$ 에서 극소치를 나타낸다. 다음으로  $T=0.8\text{sec}$ 까지는 증가하다가 극대치를 취한 후로 감소하며,  $T=0.97\text{sec}$ 에서 극소치를 나타내고 후로는 주기가 증가함에 따라 상승하는 결과를 볼 수 있다.  $T=0.64\text{sec}$ 에서 반사율이 극소치를 나타내는 것은 짧은 측의 고유주기에 대략 대응하는 것으로 판단되며, 또한  $T=0.97\text{sec}$ 에 전달율이 극소치를 나타내는 것도 긴 측의 고유주기에 대략 상당하는 것으로 추정된다. 한편, 대부분의 파랑에너지가 전달되는  $C_t > 0.8$ 의 영역은  $T > 1.4\text{sec}$ 의 영역으로 주어지며, 이는 전술한 폰툰형 부소파제보다는 월등히 파랑제어기능이 향상되었고, 더불어 연직판각형 부소파제보다도 장주기파의 파랑제어성능이 다소 향상된 것으로 판단된다. 여기서, 수평간격 5cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 1.0\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어

지며, 현지파랑으로 환산하면 4.5secc보다 작은 주기의 파랑에 대해서 파랑제어기능을 갖는 것으로 된다. 이와 같은 결과는 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 상당히 개선된 결과를 주고 있고, 원전어항에서 채용된 연직판각형 부소파제보다는 단주기측에서 약간 저조한 값을 나타내지만, 전술한 바와 같이 장주기측에서는 보다 향상된 파랑제어기능을 갖는다.

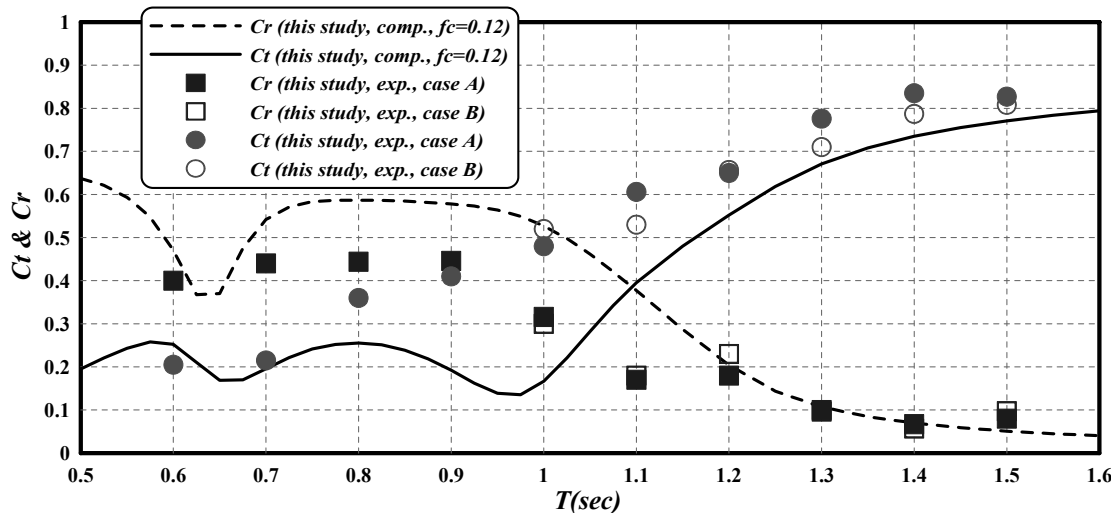


Fig. 3.44. 반사율과 전달율(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

다음으로 수치해석결과의 타당성을 살펴보면 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화 경향은 실험치와 잘 일치하고 있으며, 더불어  $T=1.0, 1.1\text{sec}$ 의 반사율과  $T=0.9, 1.0\text{sec}$ 의 전달율에서 두 결과치의 사이에 약간의 차이가 주어지지만 전체적으로 두 결과의 대응성이 좋은 것으로 판단되므로 이 수치해석결과의 타당성을 확증할 수 있을 것이다.

### (c) 에너지감쇠

Fig. 3.45는 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면  $T=0.64, 1.07\text{sec}$ 에서 극대치를 나타내고, 최대의 에너지감쇠 80%를 나타내며,  $T>1.07\text{sec}$ 의 이후에는 에너지감쇠율이 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 두 값의 대응성은 만족스럽다. 전술한 폰툰형 및 연직판각형 부소파제에서와 같이 에너지감쇠율의 최대값을 갖는 주기는 연직 및 회전운동의 고유주기에 상당하며, 이와 같은 결과는 연직 및 회전운동의 고유주기에서 부체의 운동이 크게 되어 우각부에서 강한 와가 형성되고, 동시에 부체구조물과 파랑운동과의 사이에 큰 마찰이 발생하여 결과적으로 많은 파랑에

너지가 소산되기 때문이다.

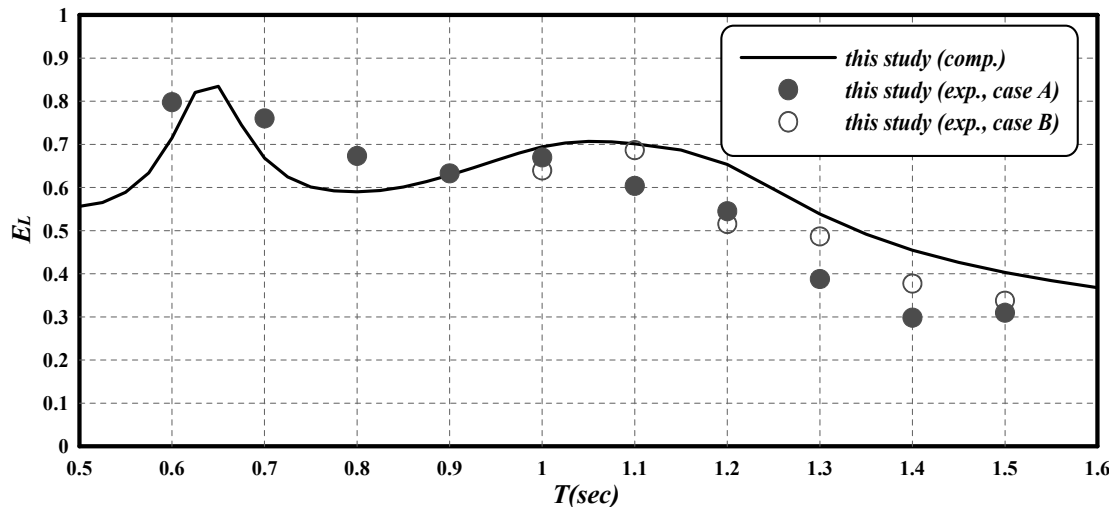


Fig. 3.45. 에너지감쇠율(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

#### (d) 부체의 운동

복합판형 부소파제에 대한 重心의 수평운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.46에 주어져 있다. 결과를 살펴보면 전술한 폰툰형 부소파제의 경우와 유사한 변화과정을 나타내며, 연직판각형 부소파제와는 고유주기대 근방에서 약간 상이한 변화과정을 나타낸다. 여기서, 주기의 변화에 따라  $T=0.64\text{sec}$  및  $1.07\text{sec}$ 의 부근에서 변곡점과 유사한 현상이 나타나는 것은 회전운동의 고유주기와 밀접한 연관성을 가지기 때문이다. 그리고, 전체적으로 주기가 증가함에 따라 수평운동은 증가하는 경향을 나타낸다. 수치 해석결과와 실험치의 대응성을 살펴보면 두 결과 모두 증가하는 경향을 나타내며, 모든 주기대에 걸쳐서 매우 잘 일치한다. 그리고, 입사파고의 변화에 따른 두 실험결과의 차이에서 부분적으로 비선형성을 약간 나타내지만 수평운동에서는 매우 적은 것으로 판단된다.

다음의 Fig. 3.47은 복합판형 부소파제에 대한 重心의 연직운동을 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 수치해석결과에서는 주기가 증가함에 따라 무차원연직운동의 최대값이 주어지는  $T \approx 1.2\text{sec}$ 까지는 무차원연직운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고, 수리실험결과에서도 동일한 변화과정을 나타내고, 두 해석결과도 매우 잘 일치한다. 전술한 연직판각형 부소파제의 경우와 비교하면 대략  $T=1.2\text{sec}$ 를 나타내는 연직운동의 고유주기대가 길기 때문에 무차원연직운동의 최대값이 나타나는 주기대가 전체적으로 장주기측으로 이동되어 있다. 실험결과와 수치해석결과는 고유주기대 근방에서 약간의 차이를 나타내지만 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 잘 일치하고 있다. 이와 같은 결과

는 연직운동의 고유주기대에서 본체 상면상의 월류로 인하여 연직운동에 큰 차이를 나타낸 연직판각형 부소파제의 경우와는 상이하다. 한편, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 수평간격 5cm인 복합판형 부소파제의 연직운동에서 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다.

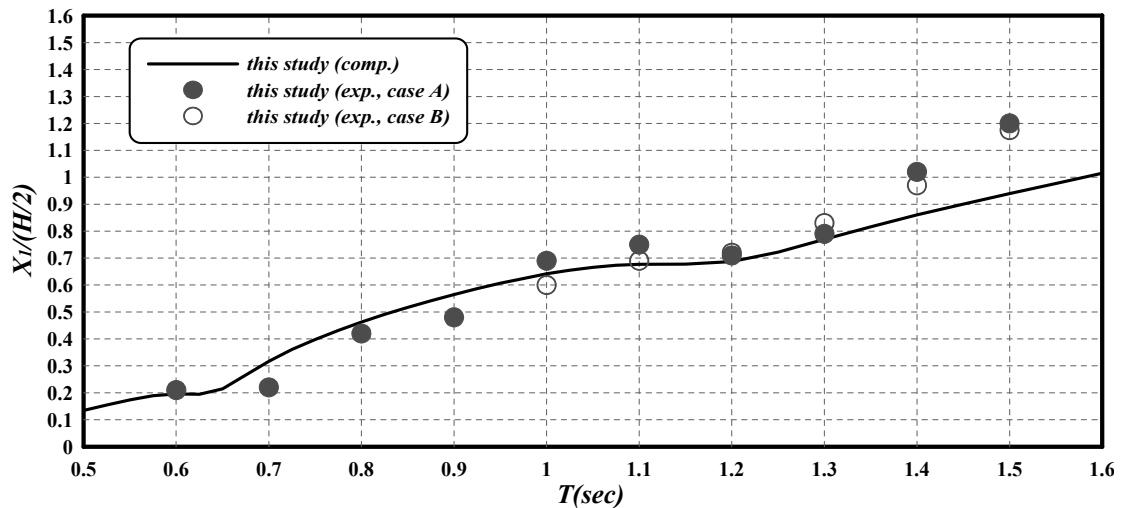


Fig. 3.46. Swaying(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

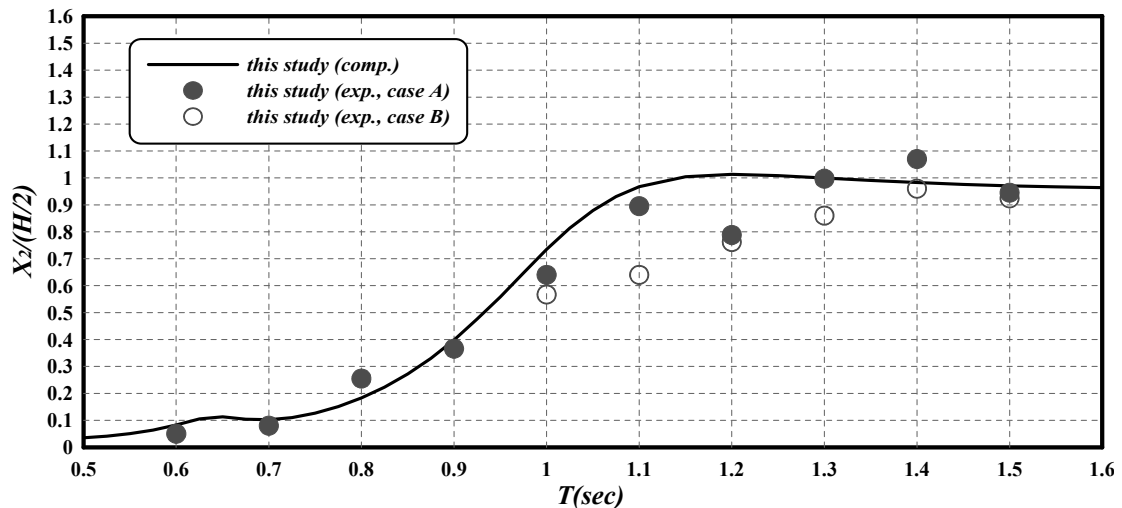


Fig. 3.47. Heaving(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

수평간격 5cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 회전운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.48에 주어져 있다. 결과로부터 주기가 증가함에 따라 무차원회전운동은  $T=0.64\text{sec}$ 에서 극대치를 나타낼 때까지 증가하고, 그 후로 감소하다  $T=0.8\text{sec}$ 에서 극소치를 나타낸다. 그리고,  $T=1.2\text{sec}$ 에서 무차원회전운동의 최대값을 나타낸 후 감소하는

경향을 나타낸다. 여기서, 무차원회전운동에서 극대치를 나타내는  $T=0.64, 1.2\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 회전운동의 고유주기에 대략 상당하는 것을 알 수 있다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과는 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 수평간격 5cm인 복합판형 부소파제의 회전운동에서 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다. 전술한 폰툰형 부소파제 및 연직판각형 부소파제의 경우와 비교하면 고유주기대 근방에서 전반적으로 회전운동량이 매우 작다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실로부터 복합판형 부소파제는 매우 안정된 형식의 부소파제라고 할 수 있을 것이다.

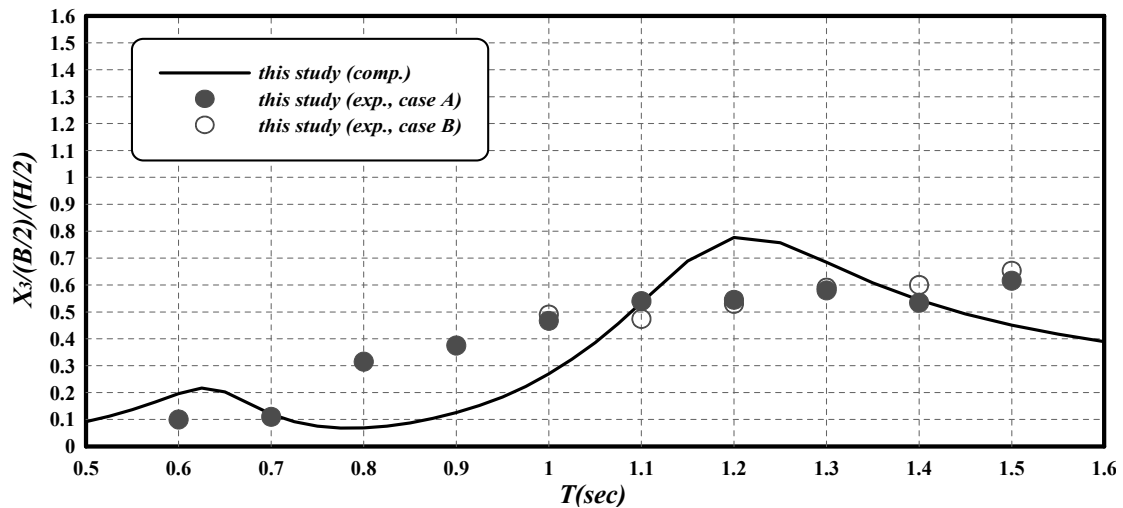


Fig. 3.48. Rolling(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

#### (e) 표류거리

다음의 Fig. 3.49는 수평간격 5cm인 복합판형 부소파제에 있어서 표류력에 의한 표류거리를 나타낸 결과이다. 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.44의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.49의 무차원표류거리의 변화과정은 반사율에서  $T=0.64\text{sec}$ 의 극소치 근방의 값들을 제외하면 표류거리의 변화는 주기의 변화에 따라 반사율의 경우와 대략 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터도 주기가 장주기측으로 이동할수록 반사율이 작아지고 대부분의 입사파랑이 전달된다는 것을 추정할 수도 있을 것이다. 그림에서 무차원표류거리가 (-)의 값을 나타내는 것은 이론적으로는 있을 수가 없지만, 수리실험에서는 수조내의 소파공에 의한 소파가 완전하지 않아 일부의 파랑에너지가 재반사되기 때문인 것으로 판단된다.



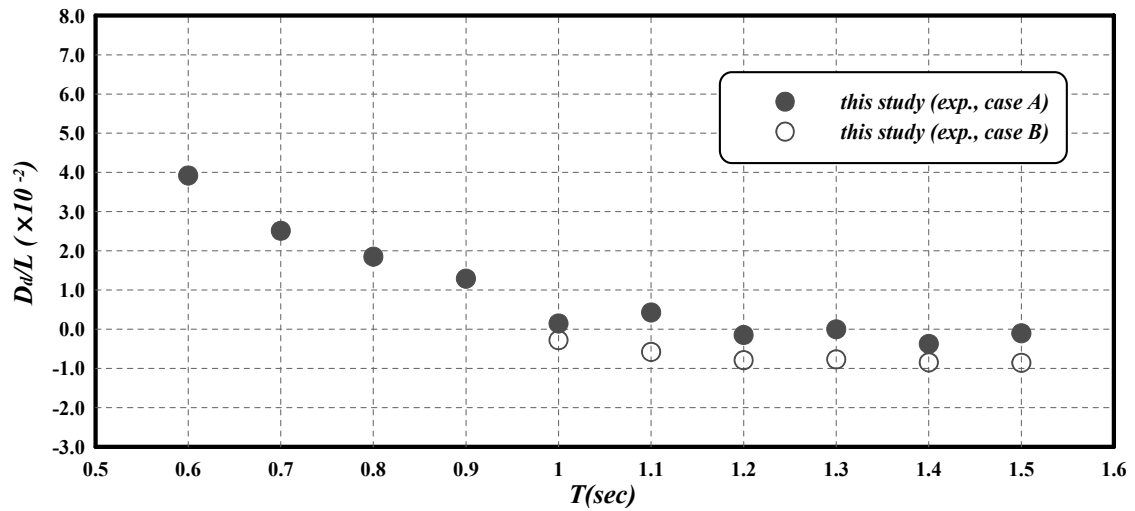


Fig. 3.49. 표류거리(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

(f) 계류라인의 장력

Fig. 3.50에 수평간격 5cm인 복합판형 부소파제의 경우에 주기의 변화에 따른 무차원장력의 변화를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 전술한 각 부소파제의 경우와 같이 동일한 주기에서 입사파고의 차이에 따라 그 결과치의 차이는 매우 크게 나타나며, 계류라인의 최대장력은 부소파제 중량의 대략 20% 정도에 달한다는 것을 알 수 있다. 이의 값은 전술한 연직판각형 부소파제의 경우보다는 약간 크다.

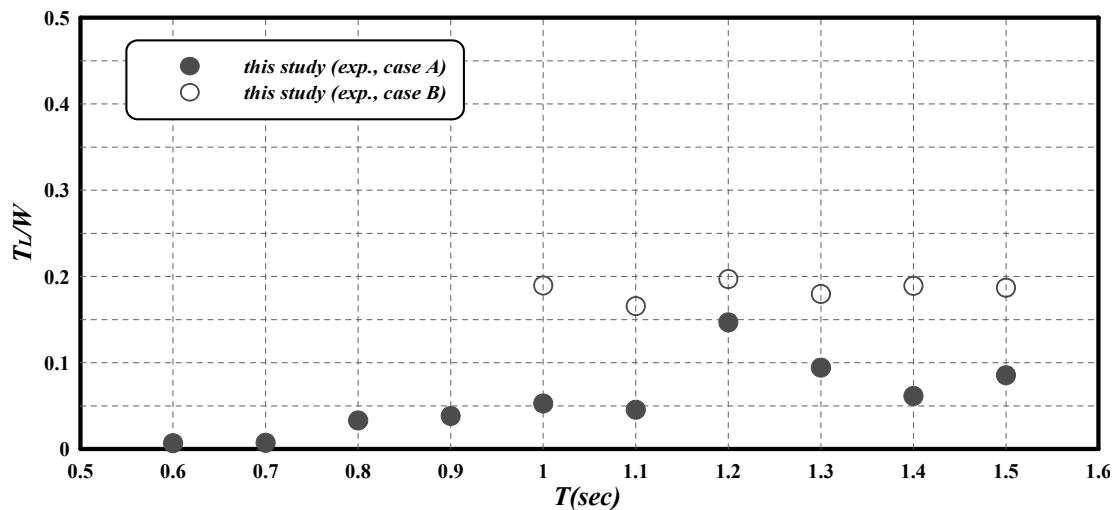
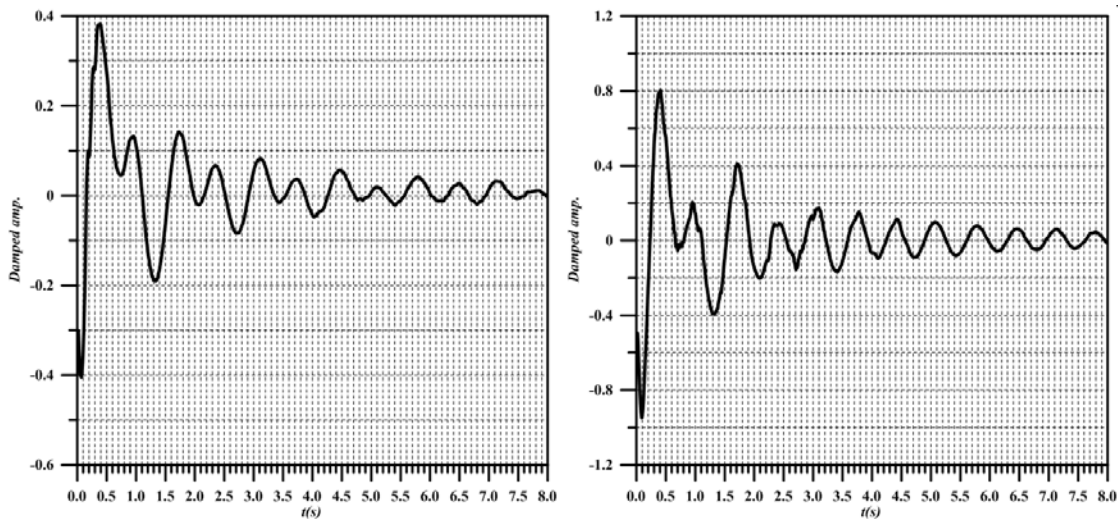


Fig. 3.50. 계류라인의 장력(FBCPT, 수평간격 : 5cm).

## (2) 수평간격이 10cm인 경우

### (a) 고유주기

수평간격 10cm인 복합판형 부소파제의 고유주기를 측정한 결과가 Fig. 3.51에 주어  
져 있다. 결과에 의하면 수평간격 5cm의 경우와 같이 두 주기성분의 고유주기를 가  
지는 것을 알 수 있다. 짧은 주기의 경우에 회전운동이  $T_n = 0.60\text{sec}$ , 연직운동이  
 $T_n = 0.80\text{sec}$ 이고, 긴 주기의 경우에 회전운동이  $T_n = 1.34\text{sec}$ , 연직운동이  $T_n =$   
 $1.31\text{sec}$ 를 갖는다. 따라서, 이의 값들로부터 입사파랑의 주기  $T \approx 0.7\text{sec}$  및  $T =$   
 $1.3\text{sec}$ 의 근방에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 크게 될 것이고, 동시에 전달  
율이 작아질 것으로 판단된다.



(a) Rolling ( $T_n = 0.60, 1.34\text{sec}$ )

(b) Heaving ( $T_n = 0.80, 1.31\text{sec}$ )

Fig. 3.51. 고유주기(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

### (b) 파랑제어

수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 나타낸 결과가 Fig.  
3.52에 주어져 있다. 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화를 살펴보면 반사율의 경우  
에 주기가 증가함에 따라  $T = 0.7\text{sec}$ 까지는 감소하고,  $T = 0.7\text{sec}$ 에서 극소치를 나타  
낸 후에 상승하면서  $T = 0.9\text{sec}$ 에서 극대치를 나타낸 후에는 감소하는 경향을 나타  
낸다. 전달율의 경우에는  $T = 0.62\text{sec}$ 에서 작은 극대치를 나타내지만  $T = 0.95\text{sec}$ 까  
지는 거의 일정치를 갖고,  $T > 0.95\text{sec}$ 의 주기영역에서는 주기가 증가함에 따라 상승  
한다.  $T = 0.7\text{sec}$ 에서 반사율이 극소치를 나타내는 것은 짧은 축의 고유주기에 대응  
하는 것으로 판단되지만, 긴 축의 고유주기인  $T = 1.32\text{sec}$ 에서는 특이한 경향을 나타

내지 않는다. 한편, 대부분의 파랑에너지가 전달되는  $C_t > 0.8$ 의 영역은 이 부소파제에 대해 검토된 주기대에서는 나타나지 않으므로 전술한 수평간격 5cm의 경우보다 장주기파의 제어능력이 향상되어 장주기파랑도 어느 정도로 제어된다는 것을 알 수 있다. 여기서, 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 1.1\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어지며, 현지파랑으로 환산하면  $T = 4.9\text{sec}$ 보다 작은 주기의 파랑에 대해서 효과적인 파랑제어기능을 갖는 것으로 된다. 이와 같은 결과는 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 상당히 개선된 결과를 주고 있고, 수평간격 5cm의 경우보다 단주기 및 장주기파랑에서 보다 월등한 파랑제어기능을 가질 뿐만 아니라, 전술한 수평간격 15cm의 연직판각형 부소파제와 비교하면  $T \leq 1.03\text{sec}$ 의 단주기 및  $T \geq 1.2\text{sec}$ 의 장주기측에서 보다 향상된 파랑제어기능을 갖는다.

다음으로 수치해석결과의 타당성을 살펴보면 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화 경향은 실험치와 매우 잘 일치하고 있으며, 더불어  $T = 0.9, 1.0\text{sec}$ 의 전달율과 반사율에서 두 결과치에서 약간의 차이가 주어지지만 전체적으로 두 결과의 대응성이 매우 좋으므로 이 수치해석결과의 타당성을 확증할 수 있을 것으로 판단된다.

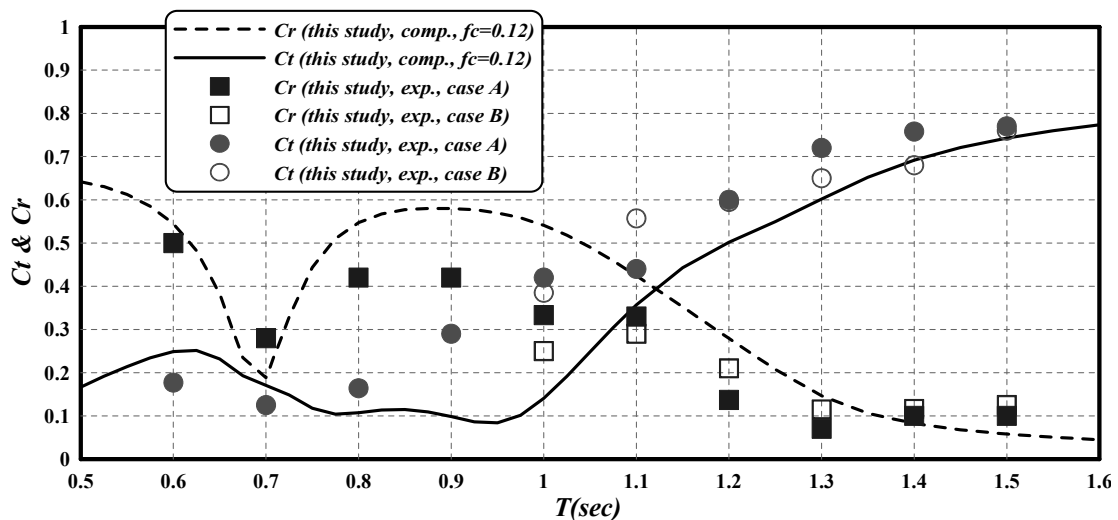


Fig. 3.52. 반사율과 전달율(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

### (c) 에너지감쇠

Fig. 3.53은 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 그림의 결과에 의하면  $T = 0.7, 1.07\text{sec}$ 에서 극대치를 나타내며, 주기  $T = 0.7\text{sec}$  부근에서 최대의 에너지감쇠 90%를 나타내고 있다.  $T > 1.07\text{sec}$ 의 영역에서는 주기가 증가함에 따라 에너지감쇠가 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 주기의

변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 두 값의 대응성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 여기서, 최대에너지감쇠는 복합판형 부소파제에 있어서 Heave 및 Roll의 짧은 축의 고유주기에 대략 상당한다.

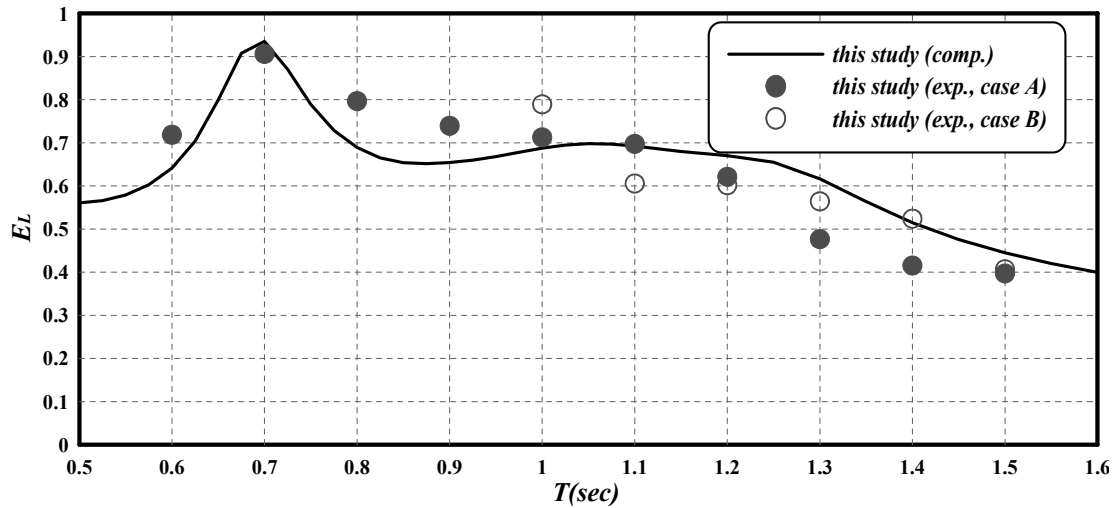


Fig. 3.53. 에너지감쇠율(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

#### (d) 부체의 운동

수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 수평운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.54에 주어져 있다. 결과로부터 수평운동은 전술한 수평간격 5cm의 경우 및 폰툰형 부소파제의 경우와 유사한 변화과정을 나타낸다. 반면에, 연직판각형 부소파제에서 나타나는 극대치를 제외하면 역시 유사한 변화과정을 나타낸다. 여기서, 주기의 변화에 따라  $T=0.7\text{sec}$  및  $T=1.22\text{sec}$ 의 부근에서 변곡점과 유사한 현상이 나타나는 것은 회전운동의 고유주기와 밀접한 연관성을 가지기 때문이다. 그러나, 전체적으로 주기가 증가함에 따라 수평운동은 증가하는 경향을 나타낸다. 수치해석결과와 실험치의 대응성을 살펴보면 두 결과 모두 증가하는 경향을 나타내며, 모든 주기대에 걸쳐서 매우 잘 일치한다. 그리고, 입사파고의 변화에 따른 두 실험해석결과의 차이에서 부분적으로 비선형성을 약간 나타내지만 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제의 Sway 운동에서 매우 적은 것으로 판단된다.

다음의 Fig. 3.55에 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 연직운동의 결과를 나타낸다. 결과를 살펴보면 수치해석결과에서는 주기가 증가함에 따라 무차원 수평운동의 최대값이 주어지는  $T=1.3\text{sec}$ 까지는 무차원수평운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고, 수리실험결과에서도 동일한 변화과정을 나타내며, 두 해석결과도 잘 일치한다. 수평간격 5cm의 경우와 같이 실험결과와 수치해석결과는 고유주기대 근방에서 약간의 차이를 나타내지만

주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 매우 잘 일치하고 있다. 한편, 입사파고의 변화에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제의 수평운동에서 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다.

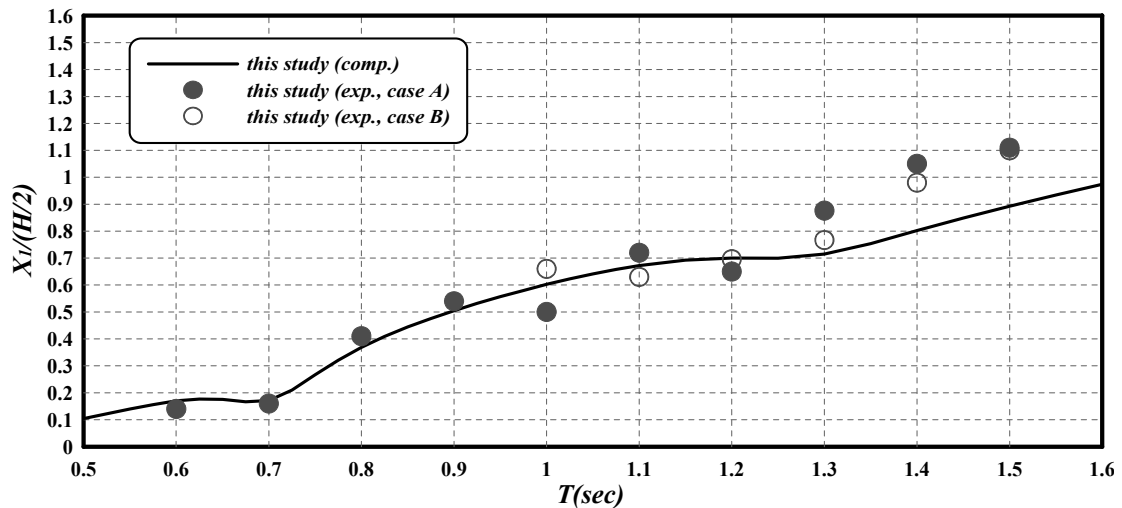


Fig. 3.54. Swaying(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

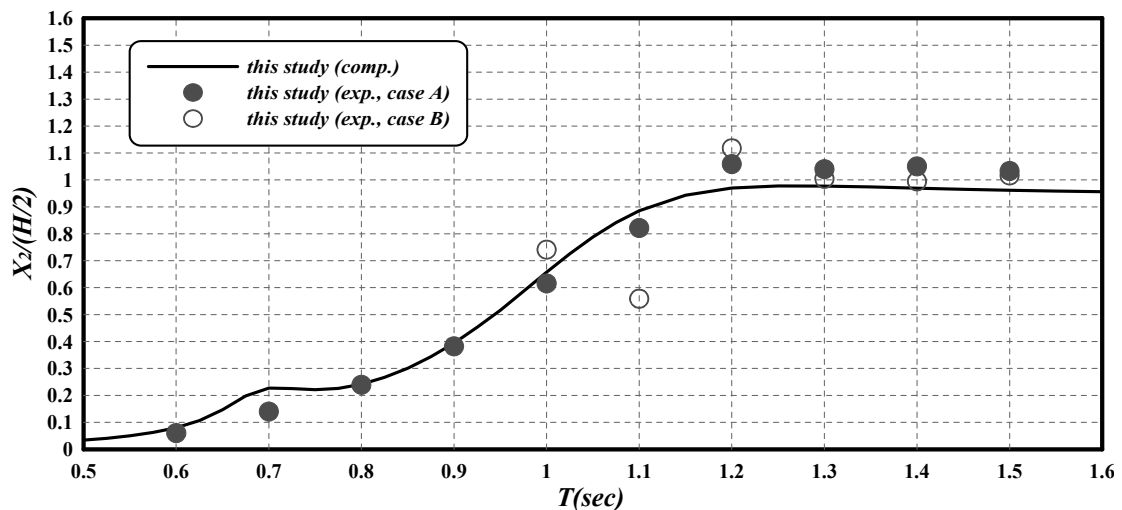


Fig. 3.55. Heaving(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 회전운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.56에 주어져 있다. 그림으로부터 주기가 증가함에 따라 무차원회전운동은  $T=0.7\text{sec}$ 까지 증가하다가  $T=0.7\text{sec}$ 에서 극대치를 나타내고, 다음에 감소하다가  $T=0.88\text{sec}$ 에서 극소치를 나타낸다. 그리고,  $T=1.3\text{sec}$ 에서 무차원회전운동의 최대값을

나타낸 다음에 감소하는 경향을 나타낸다. 여기서, 무차원회전운동에서 극대치를 나타내는  $T=0.7, 1.3\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 연직운동의 고유주기에 대략 상당하는 것을 알 수 있다. 따라서, 수평운동의 경우와 동일하게 회전운동의 고유주기에서 큰 회전운동을 나타내고, 좌우의 주기대에서 운동량이 감소하여 가는 것은 전술한 수평간격 5cm의 경우와 동일하다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과는 주기의 변화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 매우 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 변화에 따른 두 실험결과에서 차이는 미소하므로 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제의 회전운동에서는 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다. 전술한 연직판 각형 부소파제의 경우와 비교하면 회전운동량이 매우 작기 때문에 매우 안정된 형식의 부소파제라고 할 수 있을 것이다.

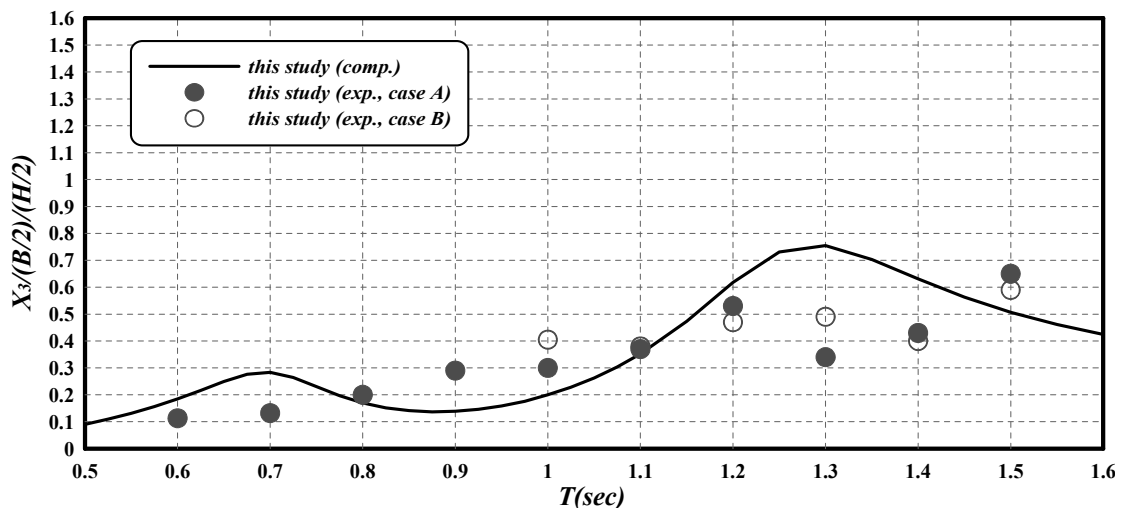


Fig. 3.56. Rolling(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

#### (e) 표류거리

다음의 Fig. 3.57은 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제에 있어서 표류력에 의한 표류거리를 나타낸 결과이다. 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.52의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.57의 무차원표류거리의 변화과정은 반사율에서  $T=0.7\text{sec}$ 의 극소치 근방에서 값들을 제외하면 표류거리의 변화는 주기의 변화에 따라 반사율의 경우와 대략 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

#### (f) 계류라인의 장력

Fig. 3.57에 수평간격 10cm인 복합판형 부소파제의 경우에 주기의 변화에 따른 무차원장력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 전술한 각 부소파제의 경우와 같이 동일한 주기에서 입사파고의 차이에 따라 그 결과치의 차이는 매우 크게 나타나며, 입사

파고가 클수록 계류장력도 크게 된다는 것을 알 수 있다. 계류라인의 최대장력은 부소파제 중량의 대략 22%정도에 달한다는 것을 알 수 있다.

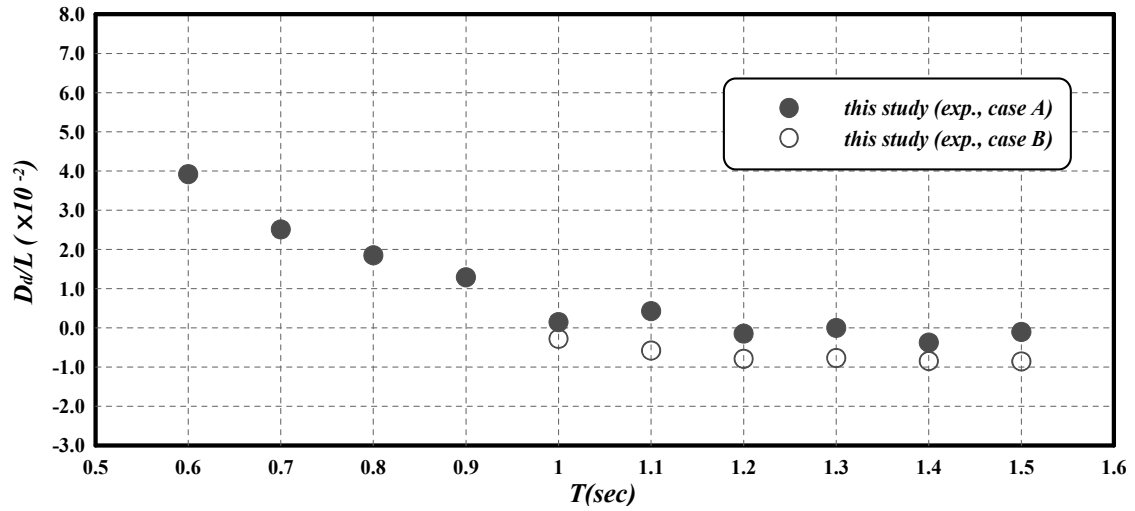


Fig. 3.57. 표류거리(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

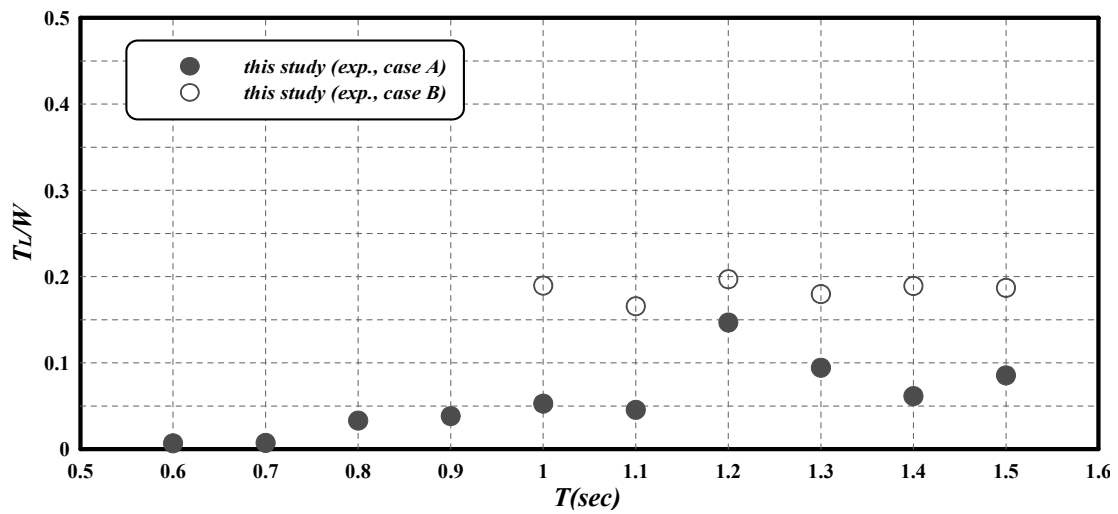


Fig. 3.58. 계류라인의 장력(FBCPT, 수평간격 : 10cm).

### (3) 수평간격이 15cm인 경우

#### (a) 고유주기

수평간격 15cm인 복합판형 부소파제의 고유주기를 측정한 결과가 Fig. 3.59에 주어  
져 있다. 결과에 의하면 전술한 수평간격 5, 10cm의 복합판형 부소파제와 유사하게  
연직판의 하부에 부착된 수평판의 영향으로 두 주기성분의 고유주기를 가지는 것을  
알 수 있다. 짧은 주기의 경우에 회전운동이  $T_n = 0.77\text{sec}$ , 연직운동이  $T_n = 0.64\text{sec}$   
이고, 긴 주기의 경우에 회전운동이  $T_n = 1.48\text{sec}$ , 연직운동이  $T_n = 1.30\text{sec}$ 를 갖는다.  
두 운동에 있어서 단주기 및 장주기의 고유주기에서 차이가 약간 발생하고 있다. 따  
라서, 이의 값들로부터 입사파랑의 주기  $T \approx 0.7\text{sec}$  및  $T = 1.39\text{sec}$ 의 근방에서 부소  
파제의 회전운동 및 연직운동이 크게 될 것이고, 동시에 전달율이 작아질 것으로 판  
단된다.

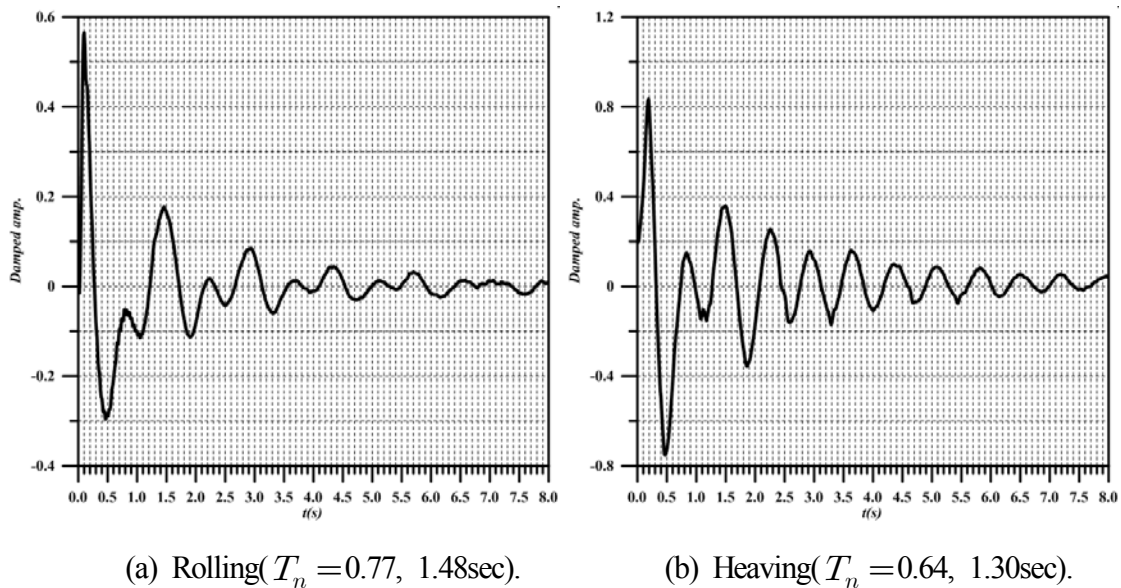


Fig. 3.59. 고유주기(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

#### (b) 파랑제어

수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑제어특성을 나타낸 결과가 Fig.  
3.60에 주어져 있다. 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화를 살펴보면 반사율의 경우  
에 주기가 증가함에 따라  $T = 0.73\text{sec}$ 까지는 감소하고,  $T = 0.73\text{sec}$ 에서 극소치를 나  
타낸 후에 상승하면서  $T = 0.94\text{sec}$ 에서 극대치를 나타낸 후에는 다시 감소하는 경향  
을 나타낸다. 전달율의 경우에는  $T = 0.64\text{sec}$ 까지는 증가하고,  $T = 0.64\text{sec}$ 에서 극대  
치를 나타낸 후에  $T = 0.9\text{sec}$ 까지 감소하다가  $T = 0.9\text{sec}$ 에서 극소치를 취한다.  $T >$



0.9sec의 주기영역에서는 주기가 증가함에 따라 상승하는 결과를 볼 수 있다.  $T=0.73\text{sec}$ 에서 반사율이 극소치를 나타내는 것은 짧은 측의 고유주기에 대응하는 것으로 판단되지만, 긴 측의 고유주기에 해당하는  $T=1.39\text{sec}$ 에서는 특이한 경향을 나타내지 않는다. 한편, 대부분의 파랑에너지가 전달되는  $C_t > 0.8$ 의 영역은 본 부소파제에 대해 검토된 주기대에서는 나타나지 않고 있다. 이로부터 전술한 수평간격 5, 10cm의 경우보다 장주기측의 파랑제어능력이 훨씬 향상되어, 장주기파랑도 상당히 제어된다는 것을 알 수 있다. 여기서, 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑제어기능성을 평가하면 전달율이  $C_t < 0.5$ 인 영역은  $T < 1.16\text{sec}$ 인 주기영역으로 주어지며, 현지파랑으로 환산하면  $T=5.2\text{sec}$ 보다 작은 주기의 파랑에 대해서 파랑제어기능을 갖는 것으로 된다. 이와 같은 결과는 전술한 폰툰형 부소파제의 경우보다 상당히 개선된 결과를 주고 있고, 전술한 수평간격 5, 10cm의 경우보다는 다소 개선된 결과를 나타낸다. 그리고, 수평간격 15cm의 연직판각형 부소파제와 비교하면 단주기측 뿐만 아니라  $T > 1.16\text{sec}$ 의 장주기측에서도 보다 향상된 파랑제어기능을 갖는다. 원전어항에서 설계파랑을 고려하면 항내정온도를 18.0cm 이하로 유지할 수 있는 것으로 된다.

다음으로 수치해석결과의 타당성을 살펴보면 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화 경향은 실험치와 매우 잘 일치하고 있으며, 더불어  $T=0.9, 1.0\text{sec}$ 의 반사율과 전달율에서 두 결과치에서 약간의 차이가 주어지지만 전체적으로 두 결과의 대응성이 매우 좋은 것으로 판단된다.

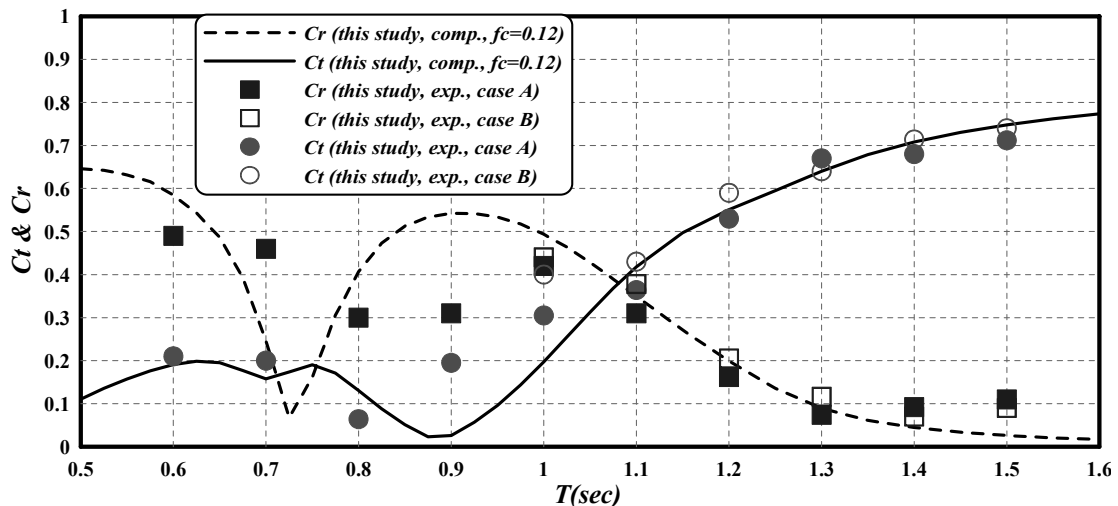


Fig. 3.60. 반사율과 전달율(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

(c) 에너지감쇠

Fig. 3.61은 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 의한 파랑에너지의 감쇠를 나타낸 결과이다. 그림의 결과에 의하면 주기가 증가하면서 에너지감쇠율은 커지고, 주기  $T=0.73\text{sec}$  부근에서 최대의 에너지감쇠 95% 이상을 나타내며, 이후에는 에너지감쇠율이 대략적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 두 값의 대응성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 여기서, 최대에너지감쇠는 기본적으로 Heave 및 Roll의 짧은 측의 고유주기에 상당하며, 이와 같은 결과는 Heave 및 Roll의 고유주기에서 부체의 운동이 크게 되기 때문이다. 그러나, 긴 측의 고유주기에서는 이러한 경향은 명확히 나타나지는 않는다.

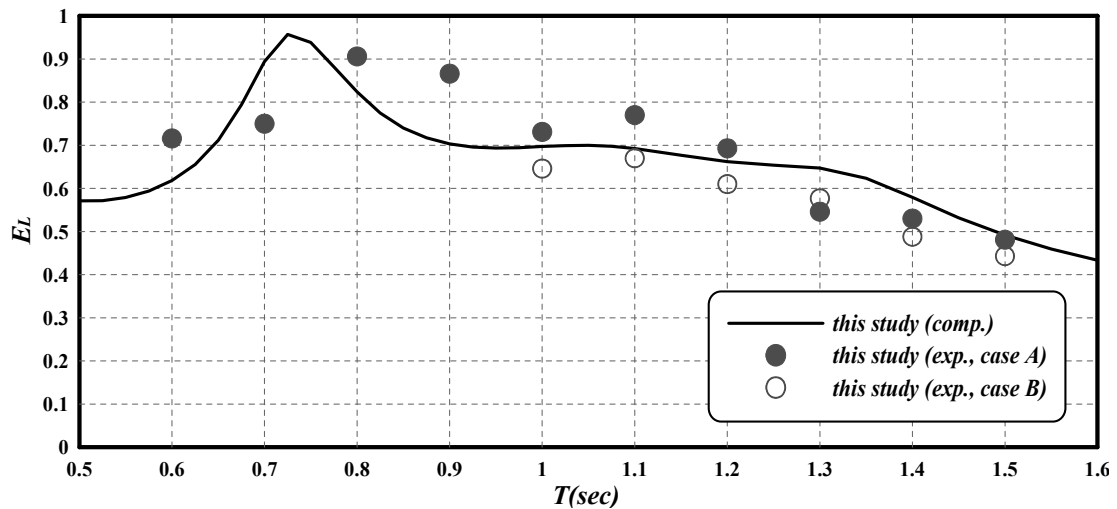


Fig. 3.61. 에너지감쇠(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

(d) 부체의 운동

수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 수평운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.62에 주어져 있다. 수평운동은 전술한 폰툰형 부소파제 및 수평간격 10cm의 경우와 유사한 변화과정을 나타내며, 또한 연직판각형 부소파제에서 나타나는 극대치를 제외하면 역시 유사한 변화과정을 나타낸다. 여기서, 주기의 변화에 따라  $T=0.73\text{sec}$  및  $T=1.3\text{sec}$ 의 부근에서 변곡점과 유사한 현상이 나타나는 것은 회전운동의 고유주기와 밀접한 연관성을 가지기 때문이다. 그러나, 전체적으로 주기가 증가함에 따라 수평운동은 증가하는 경향을 나타낸다. 수치해석결과와 실험치의 대응성을 살펴보면 두 결과 모두 증가하는 경향을 나타내며, 모든 주기대에 걸쳐서 매우 잘 일치한다. 그리고, 입사파고의 차이에 따른 두 실험해석결과의 차이에서 부분적으로 비선형성을 약간 나타내지만 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제의 수평운동에서는 매우 적은 것

으로 판단된다.

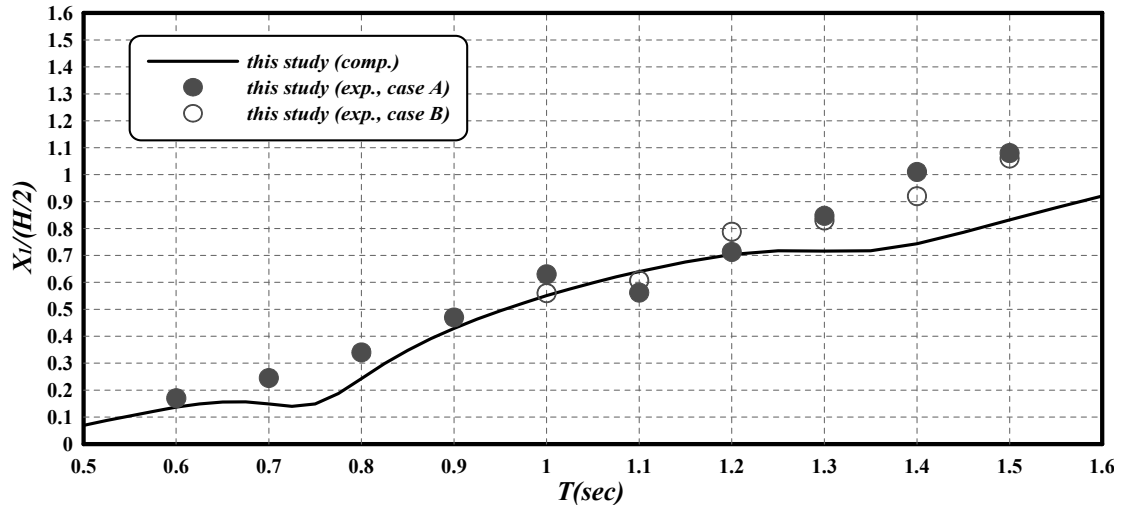


Fig. 3.62. Swaying(FBCPT, 수평간격: 15cm).

수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 연직운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.63에 주어져 있다. 그림을 살펴보면 수치해석결과에서는 주기가 증가함에 따라 무차원연직운동의 최대값이 주어지는  $T=1.3\text{sec}$ 까지는 무차원연직운동이 증가하는 경향을 나타내고, 이후에 대해서는 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 수리실험결과에서도 동일한 변화과정을 나타내지만  $T=1.1, 1.2\text{sec}$ 에서 두 해석결과 사이에 약간의 차이가 발생하고 있다. 그러나, 전체적으로 그 대응성이 좋은 것으로 판단된다. 여기서, 두 결과의 차이는 고유주기대에서 큰 운동으로 부체상면을 통한 월류가 크게 발생하기 때문이다. 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제의 연직운동에서 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다.

수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 대한 重心의 회전운동을 나타낸 결과가 Fig. 3.64에 주어져 있다. 그림으로부터 주기가 증가함에 따라 무차원회전운동은  $T=0.75\text{sec}$ 까지 증가하다가  $T=0.75\text{sec}$ 에서 극대치를 나타내고, 다음에 감소하다가  $T=0.95\text{sec}$ 에서 극소치를 나타낸다. 그리고,  $T=1.35\text{sec}$ 에서 무차원회전운동의 최대값을 나타낸 다음에 감소하는 경향을 나타낸다. 여기서, 무차원회전운동에서 극대치를 나타내는  $T=0.75, 1.35\text{sec}$ 는 전술한 고유주기에서 회전운동의 고유주기에 대략 상당하는 것을 알 수 있다. 따라서, 연직운동의 경우와 동일하게 회전운동의 고유주기에서 큰 회전운동을 나타내고, 좌우의 주기대에서 운동량이 감소하여 가는 것은 전술한 수평간격 5, 10cm의 경우와 동일하다. 그리고, 실험결과와 수치해석결과는 주기의 변

화에 따른 운동의 변화과정과 운동량에서 매우 잘 일치하고 있다. 또한, 입사파고의 차이에 따른 두 실험결과에서 차이는 그렇게 크지 않으므로 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제의 Rolling에서는 비선형성의 영향은 탁월하지는 않은 것으로 판단된다.

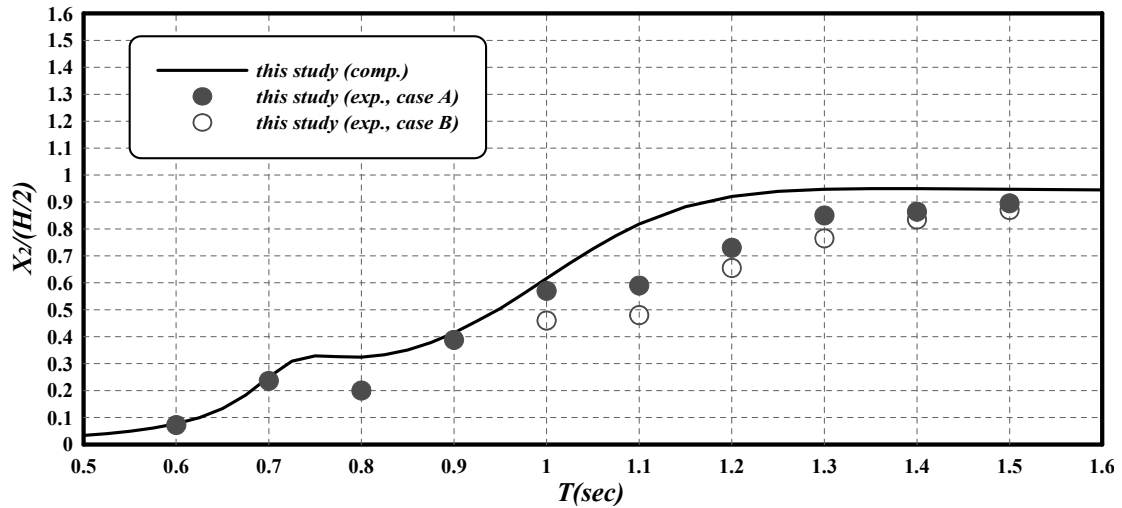


Fig. 3.63. Heaving(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

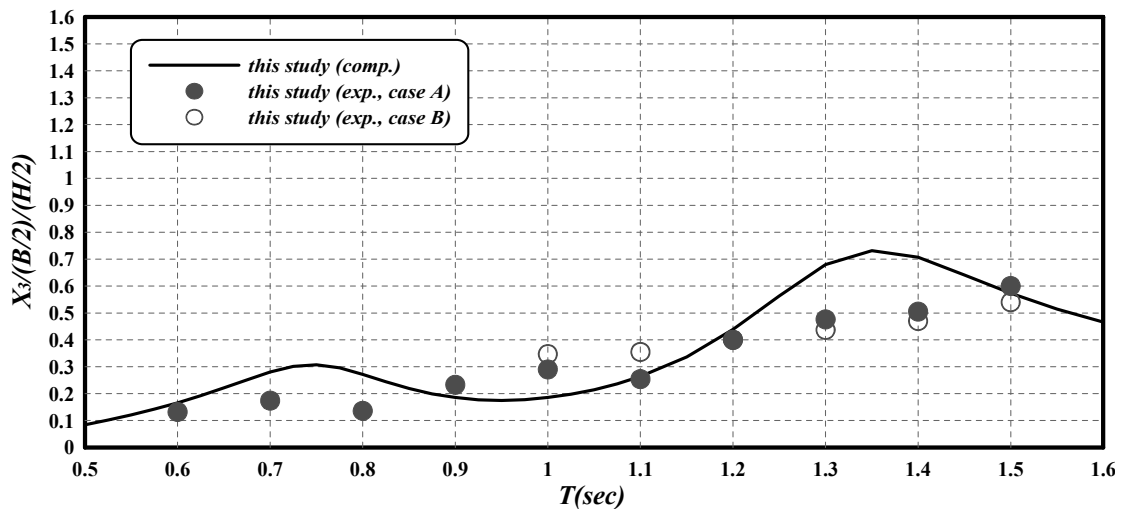


Fig. 3.64. Rolling(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

#### (e) 표류거리

다음의 Fig. 3.65은 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제에 있어서 표류력에 의한 표류거리를 나타낸 결과이다. 파랑변형을 나타낸 Fig. 3.60의 반사율의 변화과정과 수리실험에 의한 Fig. 3.65의 무차원표류거리의 변화과정은 주기의 변화에 따라  $T=0.73\text{sec}$ 의 부근에서 극소치를 나타내는 등 대략 유사한 변화경향을 나타내는 것을 알

수 있다.

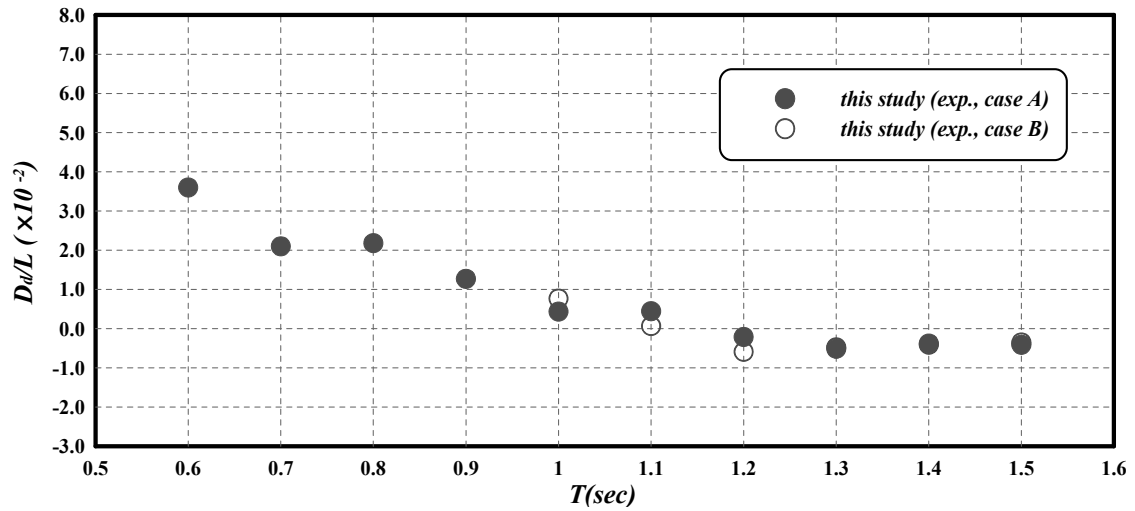


Fig. 3.65. 표류거리(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

(f) 계류라인의 장력

Fig. 3.66에 수평간격 15cm인 복합판형 부소파제의 경우에 주기의 변화에 따른 무차원장력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 전술한 각 부소파제의 경우와 같이 동일한 주기에서 입사파고의 차이에 따라 그 결과치의 차이는 매우 크게 나타나며, 입사파고가 클수록 계류장력도 크게 된다는 것을 알 수 있다. 계류라인의 최대장력은 부소파제 중량의 대략 20%정도에 달한다는 것을 알 수 있다.

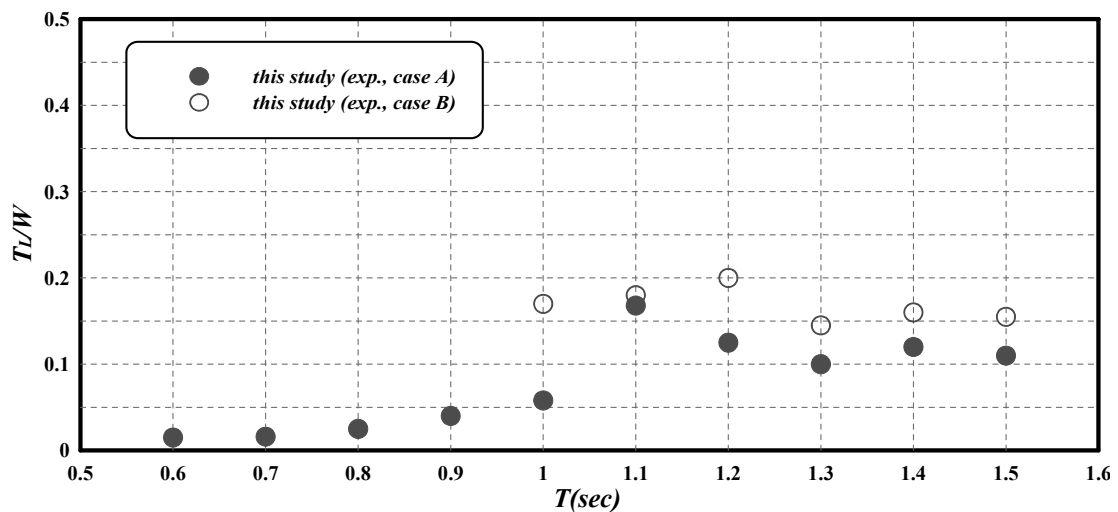


Fig. 3.66. 계류라인의 장력(FBCPT, 수평간격 : 15cm).

### 3.4.6 기존 부소파제와 전달율의 비교

다음의 Fig. 3.67에 일본에 있는 많은 어항에 기설치된 각종의 부소파제와 원전어항에 시공 중인 부소파제, 본 연구에서 수행한 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제의 전달율을  $L/B$ 의 변화에 대해 나타내고 있다. 먼저, 삼중연직벽형 부소파제의 전달율을 살펴보면 부소파제의 파랑제어능력을 평가할 수 있는  $C_t < 0.5$  영역이  $L/B = 3.8$ 의 정도로 비교적 단주기파랑의 제어에 효과가 있고, 반사방식인 폰툰형 부소파제(PCH제)의 전달율에 대해서도  $C_t < 0.5$ 의 영역이  $L/B = 3.3$ 의 정도로 파랑제어능력이 단주기측에서 발휘된다. 그리고, 경사형 부소파제의 경우도  $C_t < 0.5$ 의 영역이  $L/B = 3.7$ 의 정도로 삼중연직벽형 부소파제와 폰툰형 부소파제와 유사한 주기대의 파랑에 대해 효과적이다. 다음으로, 동요제어식 부소파제와 내부수류진동형 부소파제는  $C_t < 0.5$ 의 영역이 각각  $L/B = 4.3, 4.0$ 의 정도로 전술한 삼중연직벽형, 폰툰형 및 경사형 부소파제에 비해 제어기능이 약간 장주기측으로 이동되어 있다. 원전 부소파제도  $C_t < 0.5$ 의 영역이  $L/B = 4.4$ 의 정도로 주어지며, 이는 동요제어식 부소파제 및 내부수류진동형 부소파제와 거의 동일한 정도의 파랑제어기능을 갖는다. 여기서, 기존의 부소파제들은  $L/B = 3.3 \sim 4.4$  정도의 비교적 단주기파랑의 제어에는 효과가 있으나, 보다 장주기파랑의 제어에는 한계가 있다는 것을 알 수 있다. 다음의 연직판각형 부소파제의 경우를 살펴보면  $C_t < 0.5$ 의 영역이  $L/B = 6.2$  정도로 기존의 부소파제에 비해 파랑제어기능이 상당히 개선되어, 단주기파랑에 대해서는 원전 부소파제보다는 부분적으로는 전달율이 큰 경우도 있지만 전체적으로 안정된 값을 나타내고, 장주기파랑에 대해서도 어느 정도의 파랑제어효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안하는 복합판형 부소파제의 경우는  $C_t < 0.5$ 의 영역이  $L/B = 6.6$ 의 정도로 제어가능한 주기가 가장 장주기측으로 이동되어 있고,  $L/B > 6.6$ 의 경우에도 대략 전달율이  $C_t \leq 0.7$ 의 정도로 나타나므로 검토된 부소파제 중에서 장주기파랑제어기능이 가장 탁월한 것을 알 수 있다. 더불어, 단주기파랑의 제어도 전술한 다른 부소파제보다도 탁월하다는 것을 입증할 수 있다.

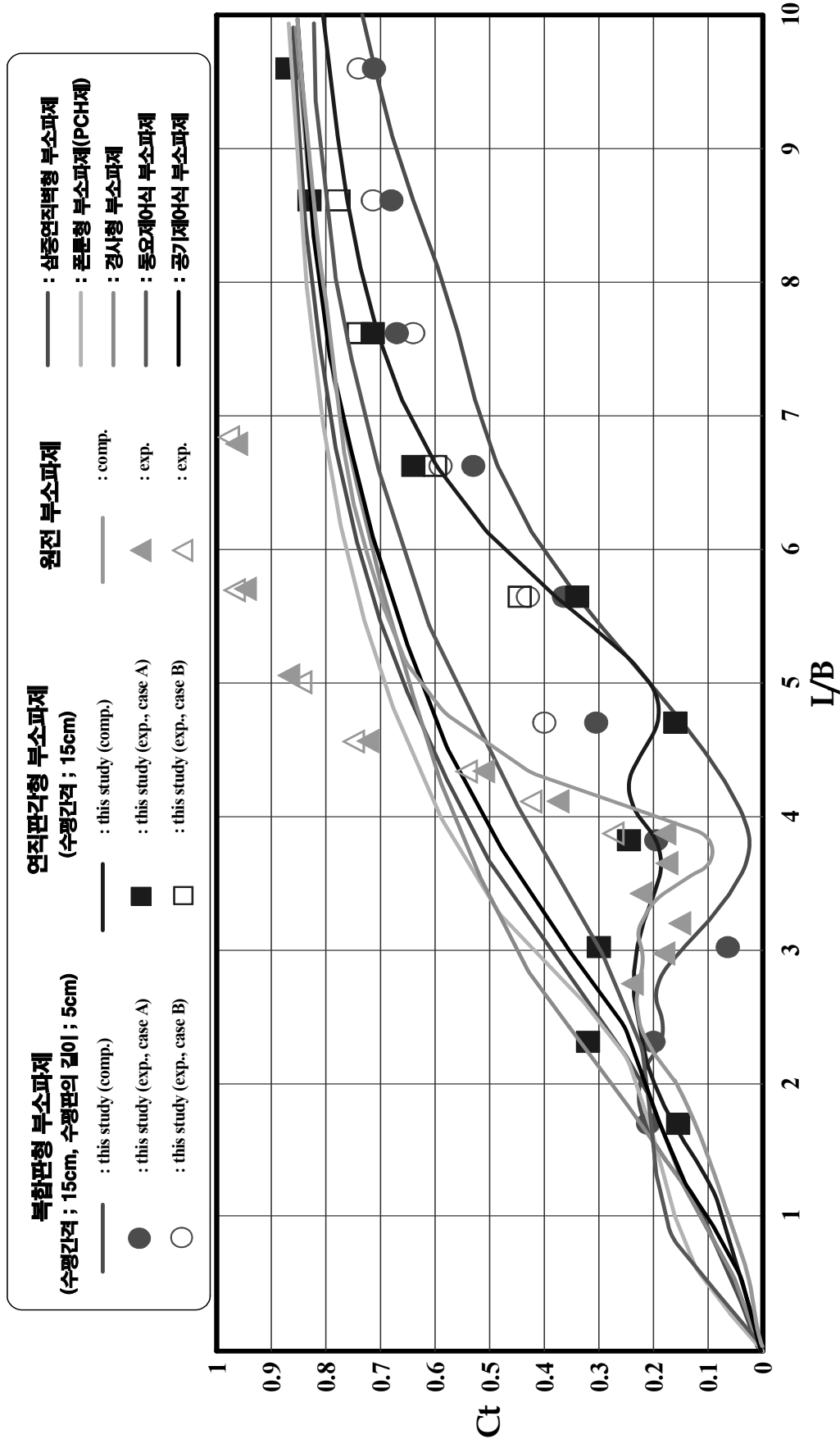


Fig. 3.67. 각 형식의 부소파제에 대한 전달율의 비교.

## 4. 부소파제의 평면파랑변형해석

### 4.1 이론적 배경

이 장에서는 원전 부소파제와 전술한 제 3장의 2차원수치해석 및 수리모형실험을 통하여 파랑제어기능이 우수한 것으로 판명된 연직판각형 부소파제와 복합판형 부소파제를 실험역에 설치하였을 경우를 대상으로 평면파랑변형을 수치해석적으로 산정한다. 수치해법으로는 연직선 Green함수에 기초한 특이점분포법(Issacson, 1978 ; 中村 와 奥, 1985 ; 이봉재, 2003)을 고정된 투과성구조물의 경우에도 적용될 수 있도록 확장한 특이점분포법(中村와 佐伯, 1999 ; 中村 등, 2002(a), 2002(b) ; 김 등, 2004)을 적용하였으며, 이는 기본적으로 불투과성구조물에 대한 결과에 부소파제에 의한 전달파의 영향을 선형적으로 중첩시키는 근사해법이다. 그리고, 이 해석법은 수심의 변화를 고려하기 어려운 단점이 있는 반면에, 해안경계면에서 임의의 반사율을 적용할 수 있고, 다른 해석법보다 계산시간이 짧은 장점이 있다. 이 때, 평면적으로 배치된 투과성구조물의 경계면에 제 3장에서 충분히 검토된 2차원해석결과인 전달을 및 반사율을 적용하여 항내의 평면파랑을 산정한다.

### 4.2 투과성구조물을 포함하는 항만영역에서 파고분포산정법

부소파제와 같은 투과성구조물이 설치된 항만영역에서의 파고분포를 산정함에 있어서 육역경계는 임의의 반사율을 갖는 불투과호안으로 가정되고, 이 수역 내에 부소파제가 설치된 Fig. 4.1과 같은 모델항만(원전어항)을 고려한다. 모델항만내는 파향  $\theta$ 를 갖고 입사하는 평면파랑, 해안경계로부터 반사되는 반사파 및 투과성구조물로부터 반사되는 반사파와 구조물을 통과하는 전달파가 동시에 존재하는 복잡한 평면파랑장이다. 이에 대해 이 연구에서 적용하고 있는 투과성구조물에 의한 평면파랑변형의 계산법은 다음과 같은 순서로 수행된다.

**Step 1** : 투과성구조물을 불투과성구조물로 간주하여 전달파의 영향을 무시한 해석을 수행한다. 이 때, 입사파랑의 수위변동과 속도포텐셜은 다음의 식(4.1), (4.2)로, 회절산란파의 속도포텐셜은 식(4.3)으로 주어진다.



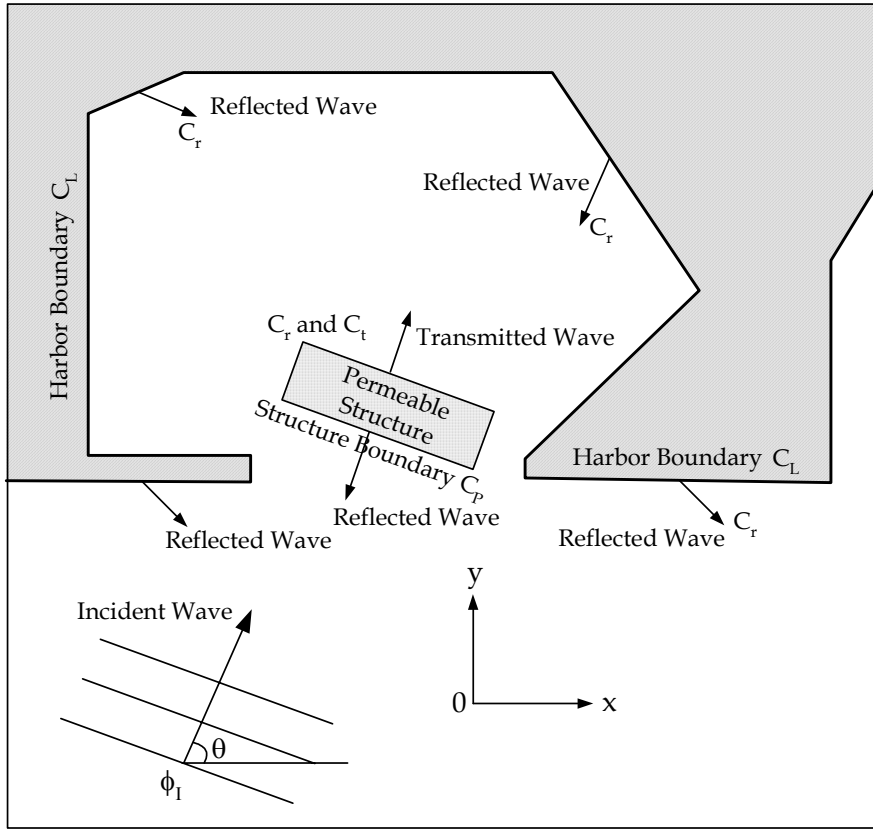


Fig. 4.1. 모델항만과 좌표계.

$$\eta_I(x, y; t) = \text{Re} \left[ \frac{H}{2} e^{i(k_x x + k_y y - \sigma t)} \right] \quad (4.1)$$

$$\phi_I(x, y, z) = -i \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi_I(x, y) \quad (4.2)$$

$$\phi_S(x, y, z) = -i \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi_S(x, y) \quad (4.3)$$

여기서,  $k_x = k \sin \theta$ ,  $k_y = k \cos \theta$ ,  $k$ 는 파진행방향의 파수,  $\theta$ 는 입사파향각,  $\phi_I$ 은 다음의 식으로 나타난다.

$$\phi_I(x, y) = e^{i(k_x x + k_y y)} \quad (4.4)$$

따라서,  $\phi_S$ 는 다음의 경계적분식으로 구해진다.

$$\phi_S = \int_{C_L + C_P} f_S(\xi, \zeta) G(x, y; \xi, \zeta) ds(\xi, \zeta) \quad (4.5)$$

여기서,  $C_L$ 은 Fig. 4.1에 나타난 항만경계,  $C_P$ 는 투과성구조물경계,  $f_S$ 는 파원강도 분포함수,  $G$ 는 연직선 Green함수로 다음의 식으로 주어진다(Issacson, 1978).

$$G(x, y; \xi, \zeta) = -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \quad (4.6)$$

여기서,  $H_0^{(1)}$ 은 0차 제1종 Hankel함수이다.

**Step 2 :** Step 1의 경계적분식에서 미지수인 파원강도 분포함수  $f_S$ 는 다음의 식과 같이 투과성구조물의 표면 및 항만경계상에서 임의반사율의 조건을 대입하여 이산화된 대수연립방정식을 해석함으로서 산정된다.

$$\begin{aligned} & \int_{C_L + C_P} f_S(\xi, \zeta) \left\{ ik\alpha(x, y) G(x, y; \xi, \zeta) + \frac{\partial G(x, y; \xi, \zeta)}{\partial n} ds(\xi, \zeta) \right. \\ & \quad \left. = - \left\{ ik\alpha(x, y) \phi_I(x, y) + \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right\} \quad \text{on } C_L + C_P \right. \end{aligned} \quad (4.7)$$

여기서,

$$\alpha(x, y) = \frac{1 - C_r(x, y)e^{i\delta(x, y)}}{1 + C_r(x, y)e^{i\delta(x, y)}} \quad \text{on } C_L + C_P \quad (4.8)$$

여기서,  $\alpha(x, y)$ 는 흡수율,  $C_r$ 은 항만경계와 구조물의 반사율,  $\delta(x, y)$ 는 반사파의 위상차이다. 그리고, 투과성구조물에서 발생하는 전달파를 입력값으로 하여 항만경계로부터의 반사파를 구하는 경우에 회절산란파 속도포텐셜은 다음의 경계적분식으로부터 산정된다.

$$\phi_R(x, y) = \int_{C_L + C_P} f_R(\xi, \zeta) G(x, y; \xi, \zeta) ds(\xi, \zeta) \quad (4.9)$$

이 때, 파원강도 분포함수는 부분반사조건을 적용하면 다음의 식으로 산정된다.

$$\begin{aligned} \int_{C_L + C_P} f_R(\xi, \zeta) \left\{ ik\alpha(x, y) G(x, y; \xi, \zeta) + \frac{\partial G(x, y; \xi, \zeta)}{\partial n} \right\} ds(\xi, \zeta) \\ = \begin{cases} - \left\{ ik\alpha(x, y) \phi_T(x, y) + \frac{\partial \phi_T}{\partial n} \right\} & \text{on } C_L \\ 0 & \text{on } C_P \end{cases} \end{aligned} \quad (4.10)$$

여기서,  $\phi_T$ 는 투과성구조물에서 발생된 전달파의 영향에 의한 항만경계상에서의 속도포텐셜을 나타내며, 이는 다음의 **Step 3**에서 얻어질 수 있다. 또한, 점  $(x, y)$ 가 투과성구조물의 경계  $C_P$ 상에 있을 때에 0이 되는 이유는 투과성구조물 자체의 전달파가 반사파에 영향을 미치지 않는 것을 가정하고 있기 때문이다.

**Step 3** : 투과성구조물에서 발생하는 전달파의 영향에 대한 평가식은 **Step 1**의 경계적분식(4.5)와 동일하지만, 경계적분은 투과성구조물의 경계선상에서만 수행된다. 이 경우의 파원강도 분포함수는 입사파의 속도포텐셜과 투과성구조물을 제외한 항만 경계에서 투과성구조물로 입사하는 파랑성분의 속도포텐셜 및 투과성구조물의 전달을 등을 고려한 적절한 조건식을 도입함으로서 다음과 같이 산정될 수 있다.

전달파의 수면변동  $\eta_T$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\eta_T(x, y, t) = C_t \eta_I(x, y, t) e^{i\delta_T} \quad (4.11)$$

여기서,  $C_t$ 는 투과성구조물의 전달율,  $\delta_T$ 는 전달율의 위상차이다.

자유표면에서 속도포텐셜의 진폭을 사용하여 나타내면 위의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_T(x, y) = C_t \phi_I(x, y) e^{i\delta_T} \quad (4.12)$$

전달파의 전파방향은 전달현상에 의하여 변화되지 않는 것으로 가정한다. 따라서, 그의 법선방향미분과 입사파의 속도포텐셜 사이에는 다음의 관계식이 성립된다.

$$\frac{\partial \phi_T}{\partial n} = i(k_x x + k_y y) C_t(x, y) \phi_I(x, y) e^{i\delta_T} \quad \text{on } C_P \quad (4.13)$$

입사파뿐만 아니라, 투과성구조물 이외의 항만경계에 의한 반사파도 존재하므로 위의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_T}{\partial n} = \left\{ i(k_x x + k_y y) \phi_I(x, y) + \frac{\partial \phi_R(x, y)}{\partial n} \right\} C_t(x, y) e^{i\delta_T} \quad \text{on } C_P \quad (4.14)$$

여기서,  $\phi_R$ 의 법선미분치는 식(4.9)를 법선미분한 식으로 산정된다. 또한, 식(4.13), (4.14)에서  $\phi_T$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\phi_T(x, y) = \int_{C_L + C_P} f_T(\xi, \zeta) G(x, y; \xi, \zeta) ds(\xi, \zeta) \quad (4.15)$$

여기서,  $f_T$ 는 투과성구조물을 빠져나가는 회절산란파(전달파)를 나타내는 파원강도 분포함수이며, 식(4.14)로 산정될 수 있다.

따라서, 평면파동장의 임의점  $(x, y)$ 에서 회절계수  $K_d$ 는 다음의 식으로 평가된다.

$$K_d(x, y) = \frac{\left| \phi_I(x, y) + \phi_S(x, y) + \sum (\phi_{Rj} + \phi_{Tj}) \right|}{\left| \phi_I(x, y) \right|} \quad (4.16)$$

여기서,  $\phi_{Rj}$ 와  $\phi_{Tj}$ 는 각 Step에서 구해지는 투과성구조물에서 발생하는 전달파에 기인하는 반사파 및 전달파의 속도포텐셜을 나타낸다.

## 4.3 해석결과

### 4.3.1 해석결과의 검증

이 연구의 타당성을 검증하기 위하여 日本土木學會 海岸工學委員會(1993)에서 제시한 결과와 곽 등(2003)의 수치해석 결과를 함께 비교하였다. 검증모델은 Fig. 4.2에 나타내는 바와 같은 영역에 반사율  $C_r = 0.4$ , 전달율  $C_t = 0.3$ 의 파랑변형계수를 갖는 투과성구조물이 설치되어 있는 경우를 고려하였으며, 이 때의 입사파 주기  $T = 5.0\text{sec}$ , 입사파고  $H = 1.0\text{m}$ 이다.

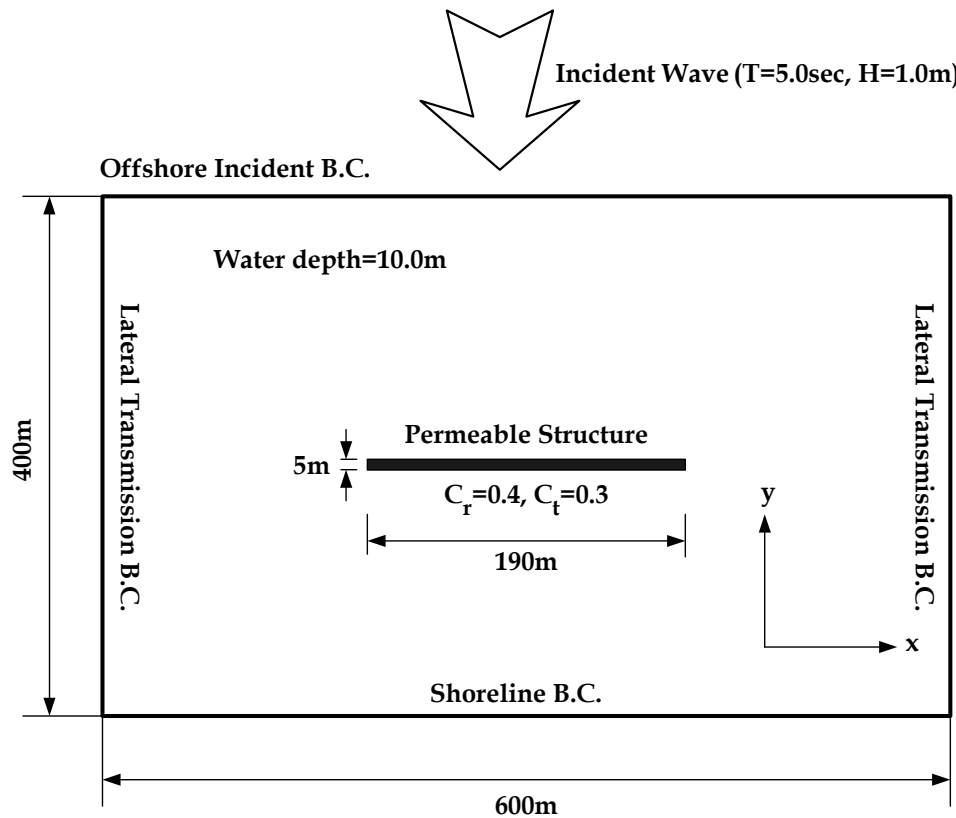


Fig. 4.2. 투과성구조물에 의한 파랑변형의 검증을 위한 모델.

수치해석결과를 살펴보면, Fig. 4.3~4.5의 세 경우 모두 구조물의 전면에서는  $K_d = 1.0 \sim 1.5$  정도로 입사파와 구조물에 의한 반사파에 의해 발생하는 부분중복파의 형성으로 파고가 증가(중복파의 배) 및 감소(중복파의 마디)하는 것을 확인할 수 있으며, 회절파의 영향이 거의 없는 구조물 배후영역의 중앙부에서는  $K_d = 0.2 \sim 0.4$  정도로 나타나며, 적용된 전달율에 따른 무차원파고분포(회절계수, 지점의 파고/입사파고)가

잘 구현되는 것을 알 수 있다. 더불어, 구조물의 양 끝단으로 갈수록 구조물의 우각  
부에서 크게 발생하는 회절파의 영향으로 무차원파고분포가 점점 커지는 것을 확인  
할 수 있다.

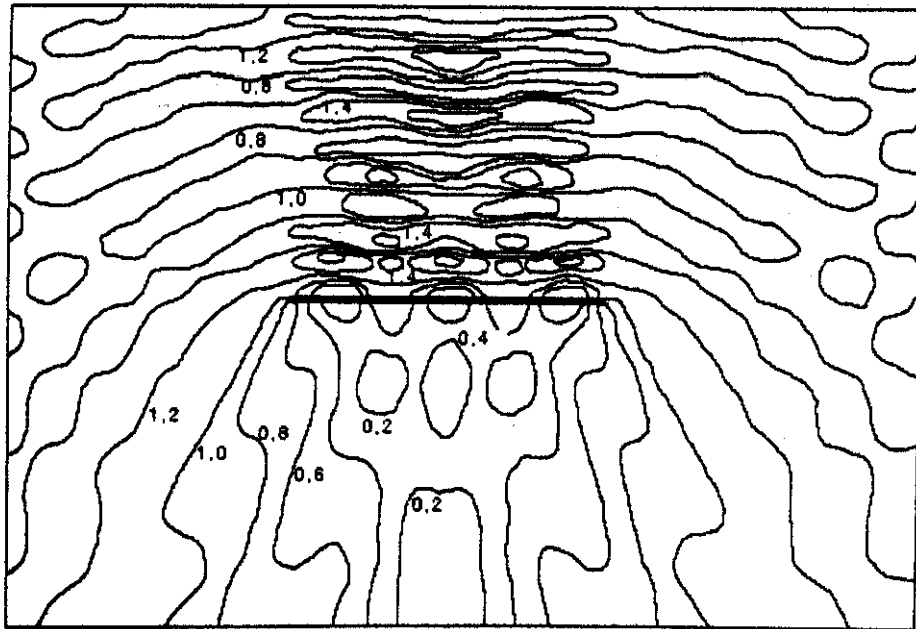


Fig. 4.3. 파고분포( $C_r = 0.4$ ,  $C_t = 0.3$  ; 日本土木學會 海岸工學委員會, 1993).

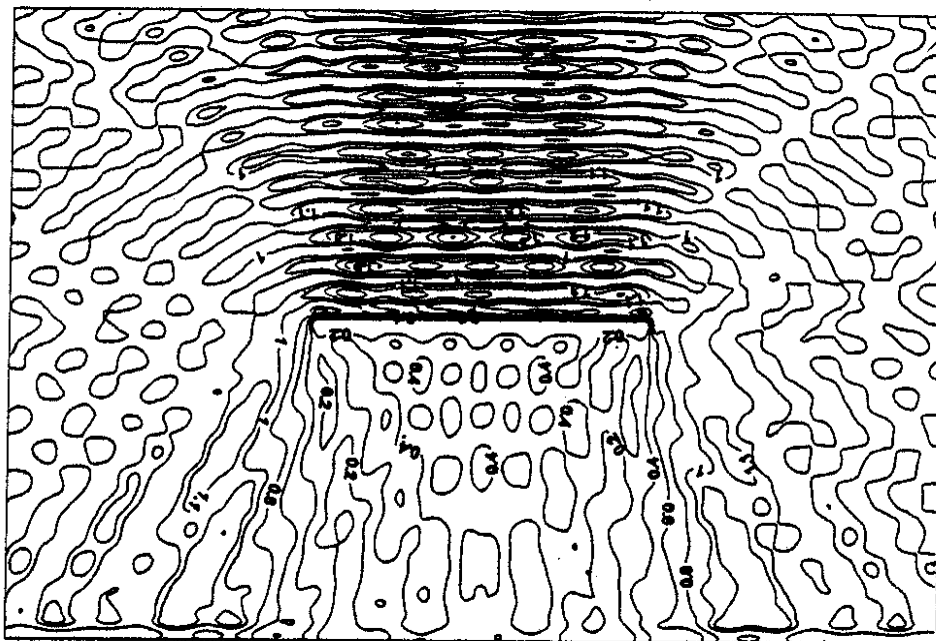


Fig. 4.4. 파고분포( $C_r = 0.4$ ,  $C_t = 0.3$  ; 곽 등, 2003).

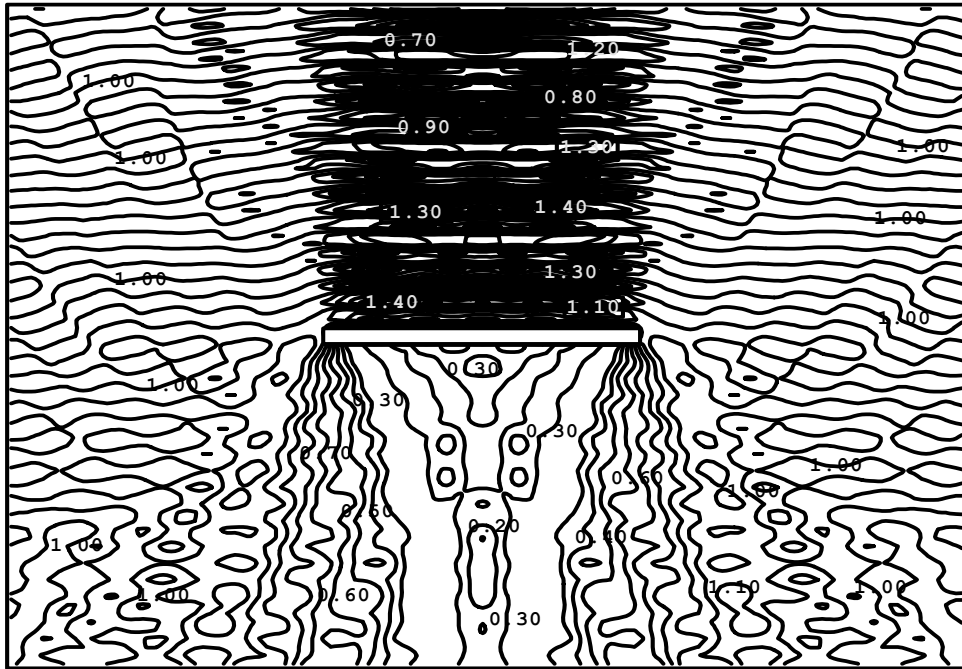
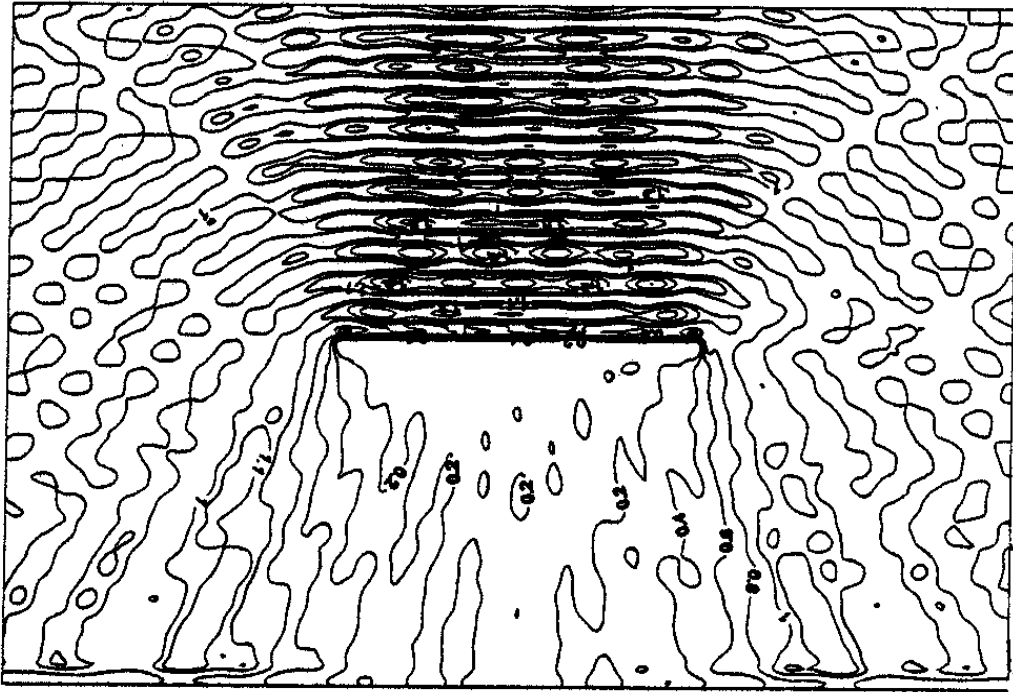


Fig. 4.5. 파고분포( $C_r=0.4$ ,  $C_t=0.3$  ; 이 연구).

다음의 Fig. 4.6(a), (b)는  $C_r=0.4$ ,  $C_t=0$ 인 불투과성구조물인 경우에 대한 계산결과이고, Fig. 4.7(a), (b)는  $C_r=0.4$ ,  $C_t=0.4$ 인 투과성구조물에 대한 계산결과로 전술한 Fig. 4.3~4.5의 경우보다 전달율을 크게 한 경우이다.

먼저, Fig. 4.6(a)와 (b)를 살펴보면 구조물 전면에서는 입사파와 구조물에 의한 반사파의 영향으로 부분중복파가 형성되어 역시 파고의 큰 변화가 나타나며, 구조물 배후해역의 중앙부에서는 불투과조건이 잘 반영되어 무차원파고분포가 거의 나타나지 않는다. 반면에, 구조물의 양 끝단에서 회절되어 구조물의 배후측면으로 유입되는 회절파랑의 영향으로  $K_d=0.1\sim0.2$  정도의 무차원파고분포가 발생한다. 여기서, Fig. 4.3~4.5에서 전달율  $C_t=0.3$ 보다 불투과성구조물로 인하여 정온도가 향상된 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.7(a)와 (b)의 경우도 구조물 전면에서의 부분중복파의 형성을 확인할 수 있으며, 구조물 배후해역의 중앙부에서는 전술한 Fig. 4.3~4.5의  $C_t=0.3$ 의 경우에 비해 증가된 전달율에 따라 무차원파고분포가  $K_d=0.1\sim0.2$  정도 상승한 결과를 나타낸다.

이상의 수치해석결과에서 입력된 반사율과 전달율에 따른 무차원파고분포가 잘 구현되고 있는 것을 알 수 있으며, 이 해석결과와 日本土木學會 海岸工學委員會(1993)에서 제시한 결과 및 곽 등(2003)의 수치해석결과와의 비교로부터 투과성구조물의 배



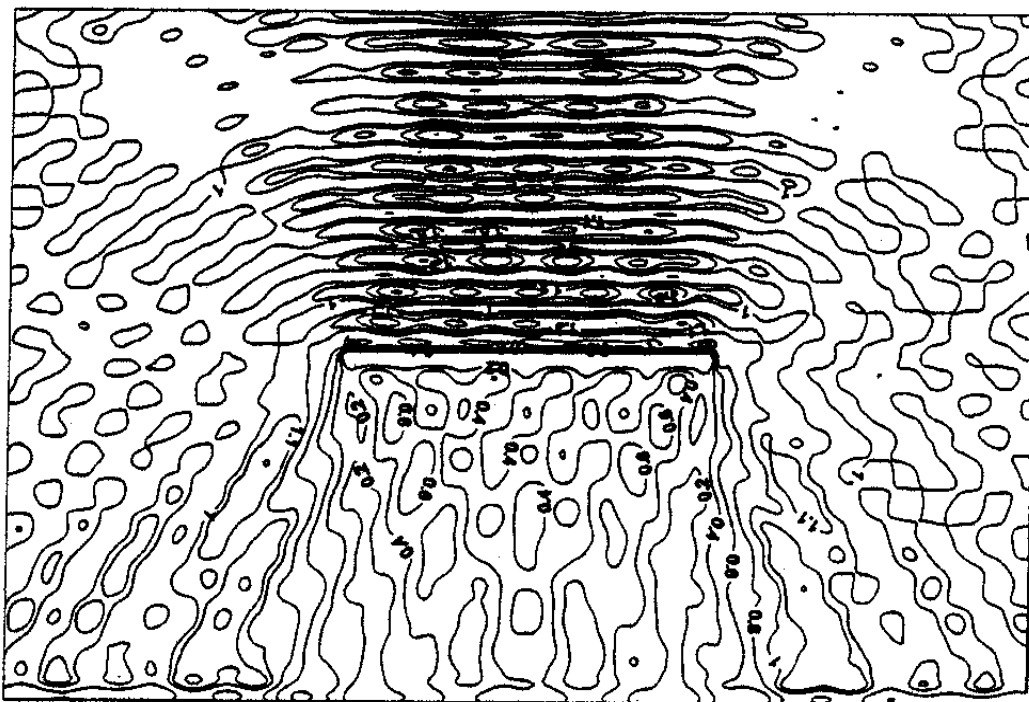
(a) 파고분포(곽 등, 2003).



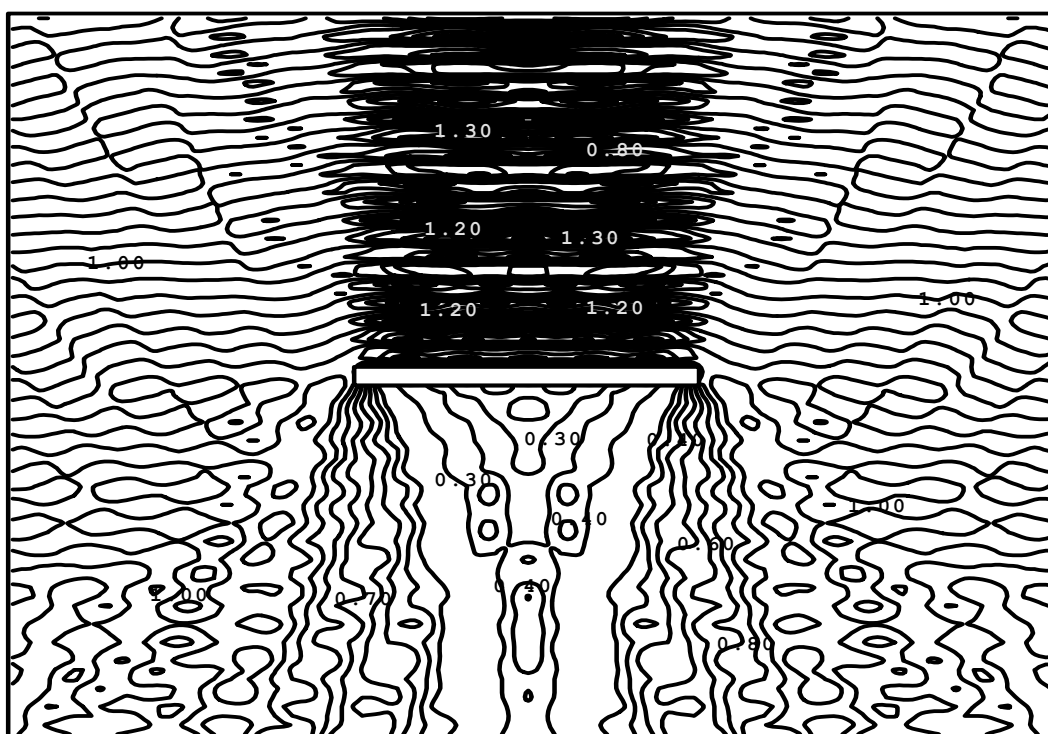
(b) 파고분포(이 연구).

Fig. 4.6. 파고분포( $C_r = 0.4$ ,  $C_t = 0$ ).





(a) 파고분포(곽 등, 2003).



(b) 파고분포(이 연구).

Fig. 4.7. 파고분포의 산정결과( $C_r=0.4$ ,  $C_t=0.4$ ).

후영역에서의 무차원파고분포가 잘 일치하므로 이 연구의 타당성을 검증할 수 있다.

#### 4.3.2 수치해석을 위한 현지모델항만

다음의 Fig. 4.8은 수치해석에 사용된 원전어항의 주변, 해안의 반사율 및 부소파제의 배치상황을 나타낸다. 여기서, 수심을 15.0m로 일정하게 두었으며, 내습파랑은 원전 부소파제를 설계할 당시에 검토된 유의파고  $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ , 유의주기  $T_{1/3} = 3.5, 5.5\text{sec}$ 의 불규칙파이다. 동일한 배치와 동일한 내습파랑의 조건하에 제시된 유의주기에 따른 원전 부소파제, 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제에 의한 평면파랑 변형을 해석하여 각각을 비교·검토한다. 입사파향은 그림중에 나타낸 바와 같고, 불규칙파랑에서 고려하는 주파수의 수는 3개이다. 그리고, 불규칙내습파랑으로 일방향 불규칙파와 다방향불규칙파를 고려하며, 일방향불규칙파랑으로는 방향집중도파라메타  $S_{\max}$ 를  $S_{\max} = 999$ 로, 다방향불규칙파랑으로는  $S_{\max} = 10$ 으로 적용하였다. 그리고, 수치해석결과에서는 실제값인 파고로 표현되어 있지만, 유의파고가 1.0m이기 때문에 회절계수로 간주하여도 무관하다.

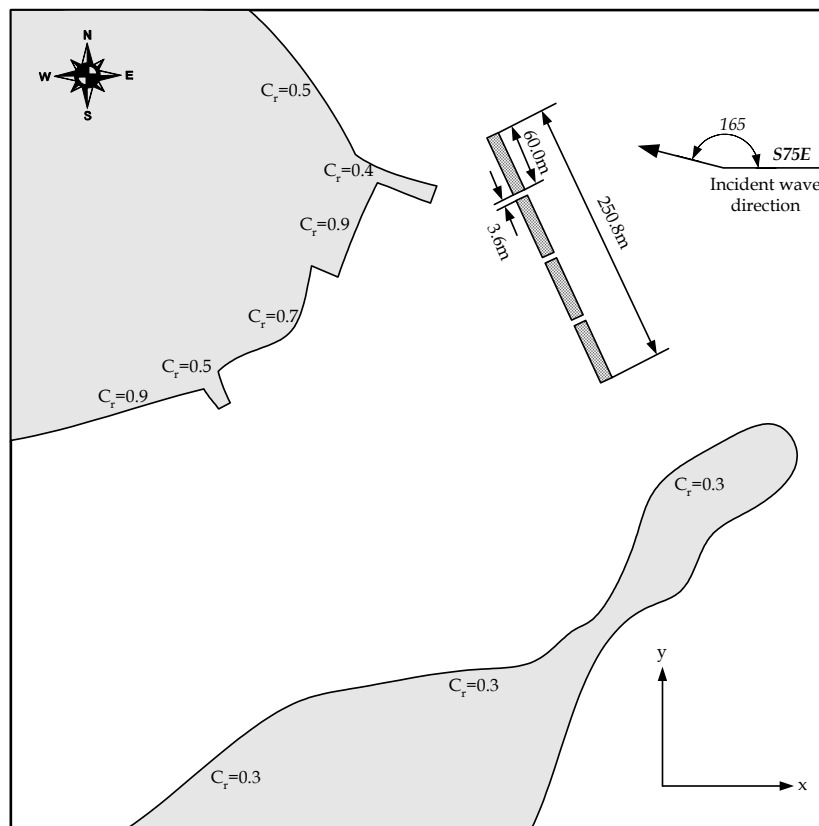
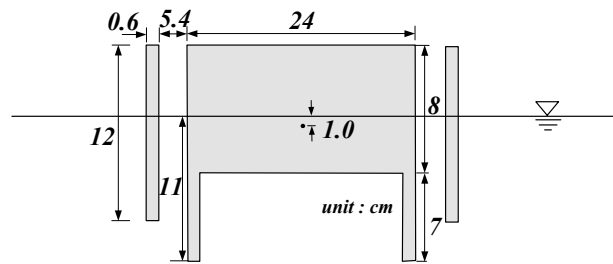


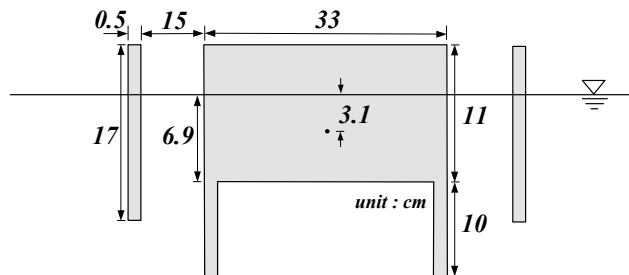
Fig. 4.8. 현지모델항만과 좌표계.

### 4.3.3 수치해석 CASE

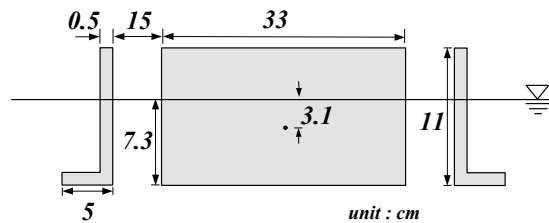
이 장의 평면파랑변형해석에 적용된 부소파제의 모형을 Fig. 4.9에 나타내며, 2차원 수리모형실험에서 얻어진 주기에 따른 파랑변형계수와 수치해석 CASE를 Table 4.1에 나타낸다. 여기서, Fig. 4.9(a)는 원전 부소파제, Fig. 4.9(b)는 원전 부소파제와 동일한 형식을 갖지만 전후연직판의 간격을 15cm로 넓게 한 연직판각형 부소파제, Fig. 4.9(c)는 전후연직판의 간격을 15cm, 하부의 수평판을 5cm로 한 복합판형 부소파제를 각각 나타낸다.



(a) 원전 부소파제.



(b) 연직판각형 부소파제.



(c) 복합판형 부소파제.

Fig. 4.9. 수치해석에 적용된 각 부소파제.

Table 4.1. 수치해석조건.

CASE	$T_{1/3}(\text{sec})$	반사율 $C_r$	전달율 $C_t$	적용된 부소파제	$S_{\max}$
1	3.5	0.40	0.20	원전 부소파제	999
2		0.60	0.27	연직판각형 부소파제	
3		0.30	0.17	복합판형 부소파제	
4	5.5	0.05	0.80	원전 부소파제	
5		0.15	0.60	연직판각형 부소파제	
6		0.25	0.50	복합판형 부소파제	
7	3.5	0.40	0.20	원전 부소파제	10
8		0.60	0.27	연직판각형 부소파제	
9		0.30	0.17	복합판형 부소파제	
10	5.5	0.05	0.80	원전 부소파제	
11		0.15	0.60	연직판각형 부소파제	
12		0.25	0.50	복합판형 부소파제	

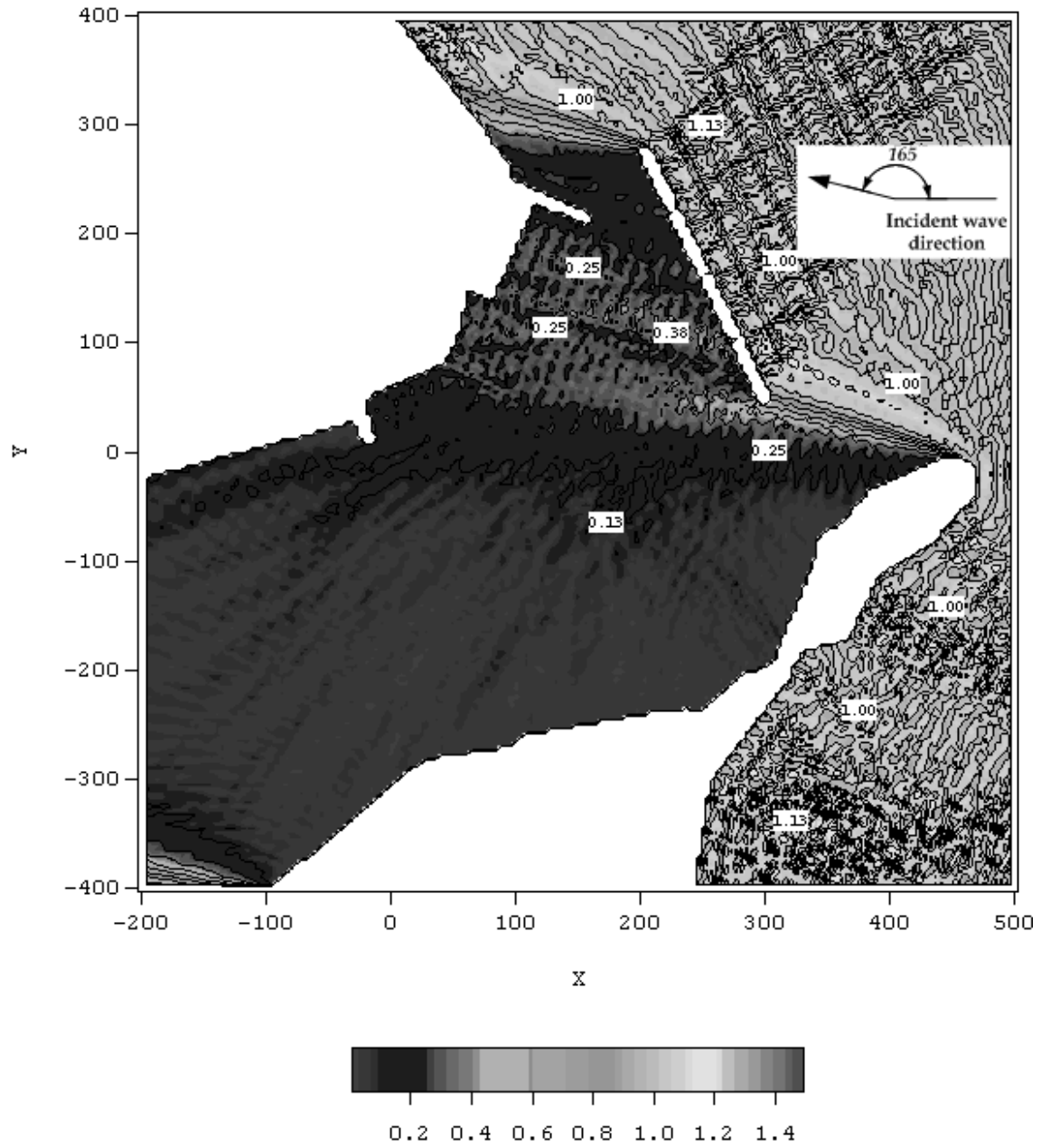
#### 4.3.4 수치해석의 결과

먼저, Fig. 4.10(a), (b), (c)는  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ 의 일방향불규칙파에 대한 원전 부소파제, 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제에 의한 평면파랑변형을 계산한 결과이다. 결과를 살펴보면, Fig. 4.10(a), (b), (c)의 3경우 모두 전달율이 낮으므로, 항내에서의 파고가 0.25~0.5m 정도로 낮게 나타나며, 부소파제 전면에서는 반사율  $C_r = 0.6$ 으로 가장 큰 Fig. 4.10(b)의 연직판각형 부소파제의 파고가 가장 높고,  $C_r = 0.3$ 인 복합판형 부소파제의 경우가 제일 낮은 파고값을 나타낸다. 비교적 단주기파랑인  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ 의 경우에는 전달율과 반사율이 모두 작은 값을 갖는 Fig. 4.10(c)의 복합판형 부소파제의 파랑제어효과가 가장 좋은 것을 알 수 있다. 여기서,  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ 의 다방향불규칙파에 대한 파랑변형을 나타낸 결과가 Fig. 4.11(a), (b), (c)에 주어져 있다. 일방향불규칙파랑과 다방향불규칙파의 경우를 비교하면 일방향의 경우보다 다방향의 경우가 작은 파고분포를 나타낸다. 이는 다방향의 경우는 파랑에너지가 한 방향에 집중되어 나타나는 일방향의 경우와는 달리 여러 방향으로 파랑에너지가 분포하기 때문이다. 결과에 따르면 다방향불규칙파의 경우에서도 Fig. 4.11(c)의 복합판형 부소파

제가 가장 뛰어난 과량제어기능을 갖는다.

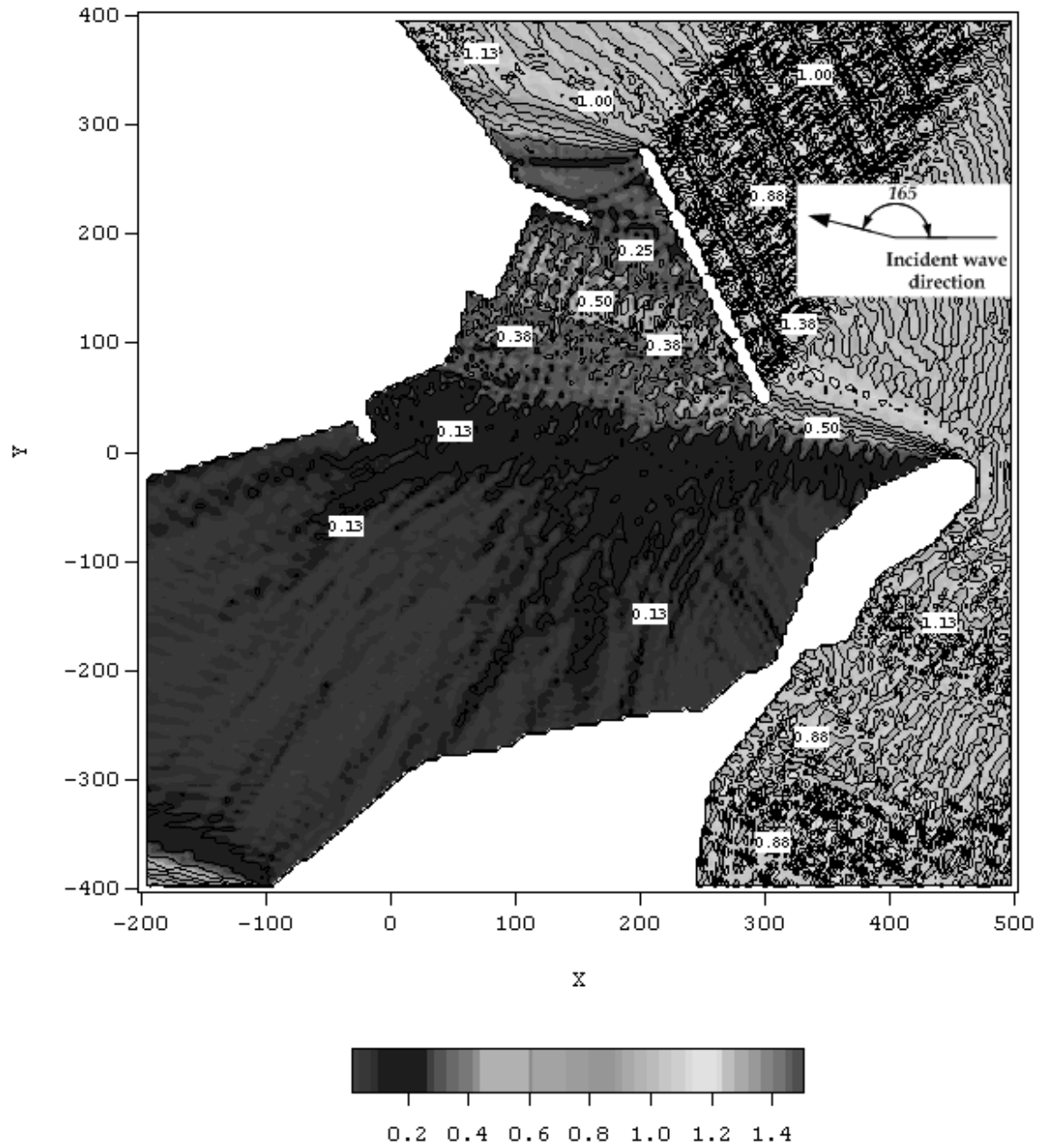
Fig. 4.12(a), (b), (c)는  $T_{1/3} = 5.5\text{sec}$ 의 일방향불규칙파의 경우에 각 부소파제에 대한 수치해석결과를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 4.12(a)의 원전 부소파제는 비교적 장주기파랑인  $T_{1/3} = 5.5\text{sec}$ 인 경우에 전달율은  $C_t = 0.8$ 로 높은 값을 가지기 때문에 부소파제를 통하여 항내로 유입되는 전달파의 영향과 전달된 파가 항만경계에서 반사되면서 부소파제의 배후에 발생하는 부분중복파의 영향으로 정온도가 나빠지는 것을 볼 수 있다. 그리고, Fig. 4.12(b)의 연직관각형 부소파제의 경우도 전달율이  $C_t = 0.6$ 으로 다소 높은 값을 가지므로 항내정온도가 떨어진다. 반면에, Fig. 4.12(c)의 복합관형 부소파제는 이 중에 가장 작은 전달율을 가지기 때문에 과량제어성능이 가장 좋으며, 항내에서의 파고분포가  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ 의 경우보다 다소 커지는 결과를 나타내지만 장주기파랑에 대해서는 원전어항의 부소파제와 연직관각형 부소파제에 비해 탁월한 과량제어성능을 갖는다. 또한,  $T_{1/3} = 5.5\text{sec}$ 의 다방향불규칙파의 경우를 나타낸 Fig. 4.13(a), (b), (c)의 경우와 비교하면, 다방향불규칙파의 경우가 역시 부소파제 배후영역에서는 낮은 파고분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 제안된 복합관형 부소파제가 원전어항에 설치된 부소파제와 연직관각형 부소파제에 비해 보다 단주기파랑에 대해서는 동일한 정도를 나타내며, 장주기파랑에 대해서는 탁월한 과량제어기능을 갖는다는 것을 평면파랑변형해석을 통해서도 확인할 수 있다.



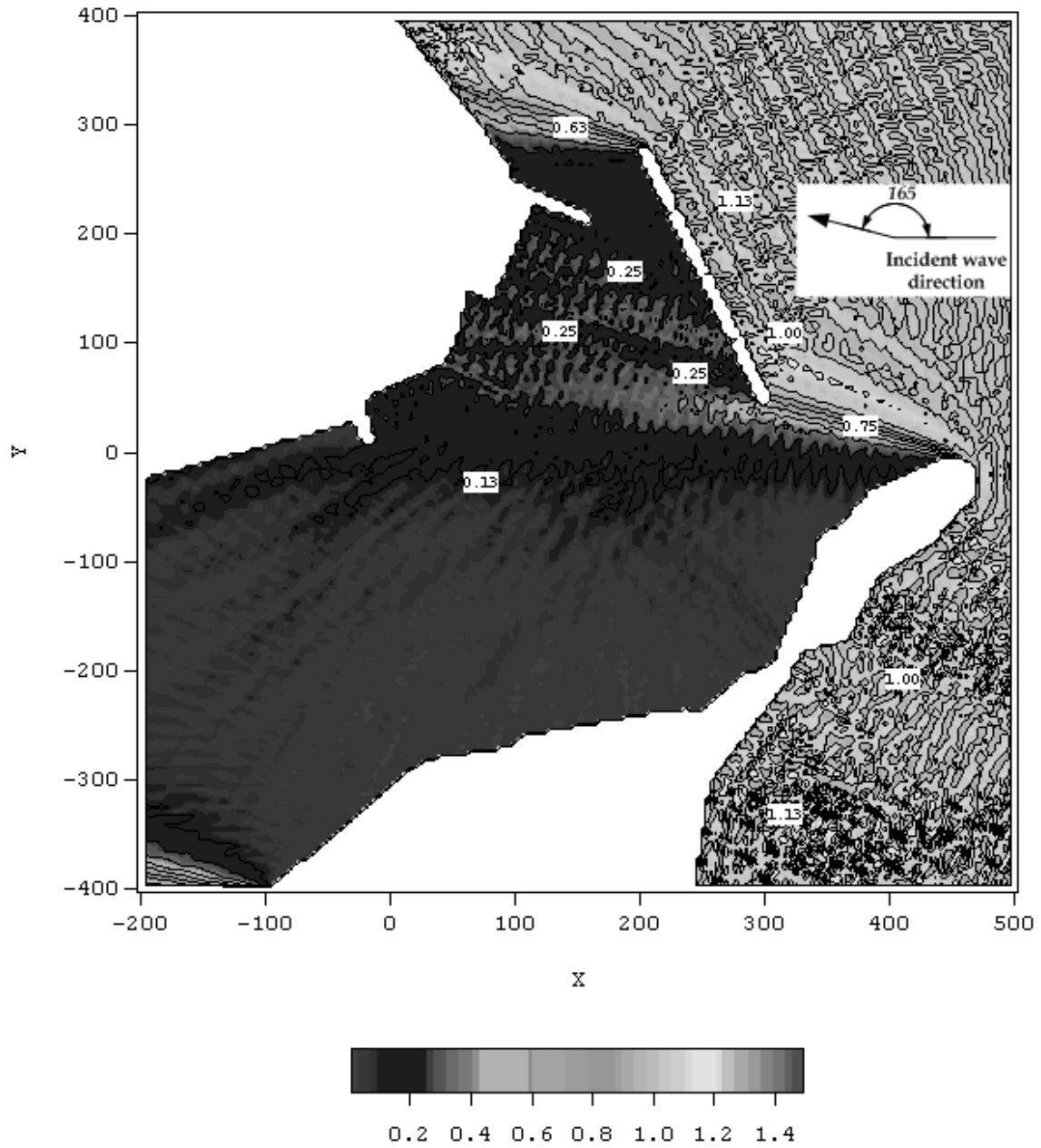
(a) 원전 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.40$ ,  $C_t = 0.20$ ).

Fig. 4.10. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3} = 1.0\text{m}, T_{1/3} = 3.5\text{sec}, S_{\max} = 999)$ .



(b) 연직판각형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r=0.60$ ,  $C_t=0.27$ ).

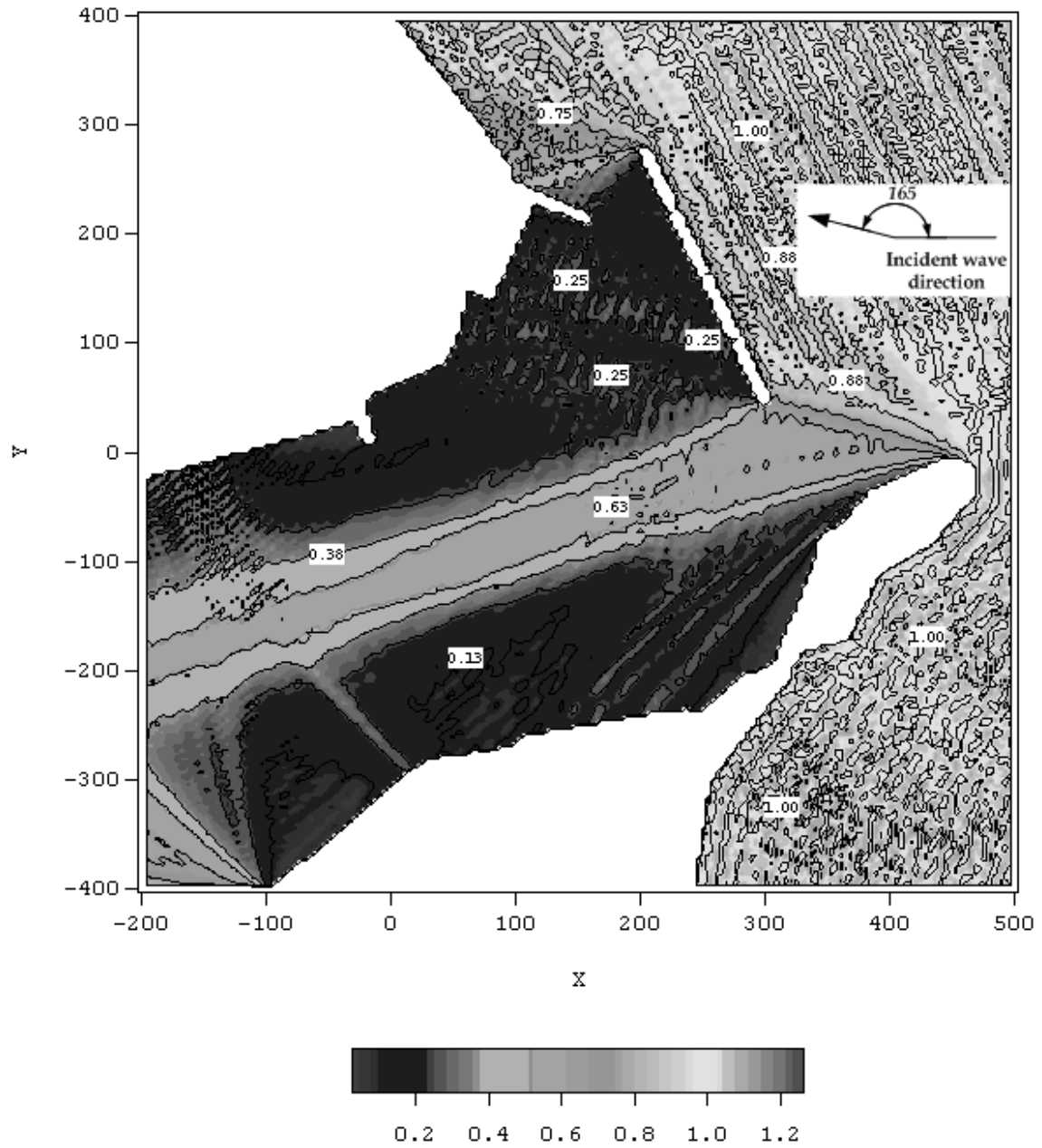
Fig. 4.10. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3}=1.0\text{m}, T_{1/3}=3.5\text{sec}, S_{\max}=999)$ .



(c) 복합판형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.30$ ,  $C_t = 0.17$ ).

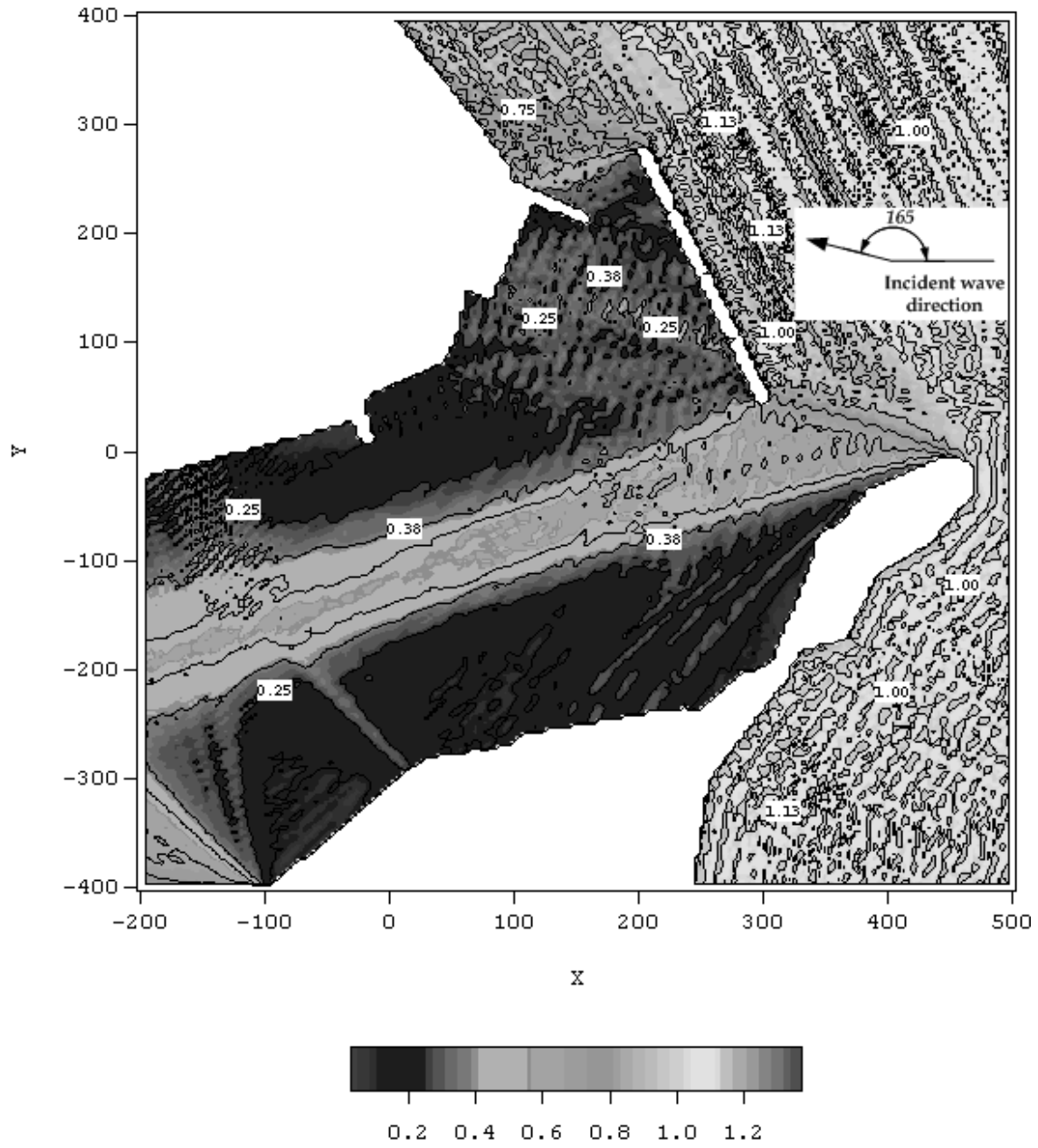
Fig. 4.10. 각 부소파제 의한 파고분포  
( $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ ,  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ ,  $S_{\max} = 999$ ).





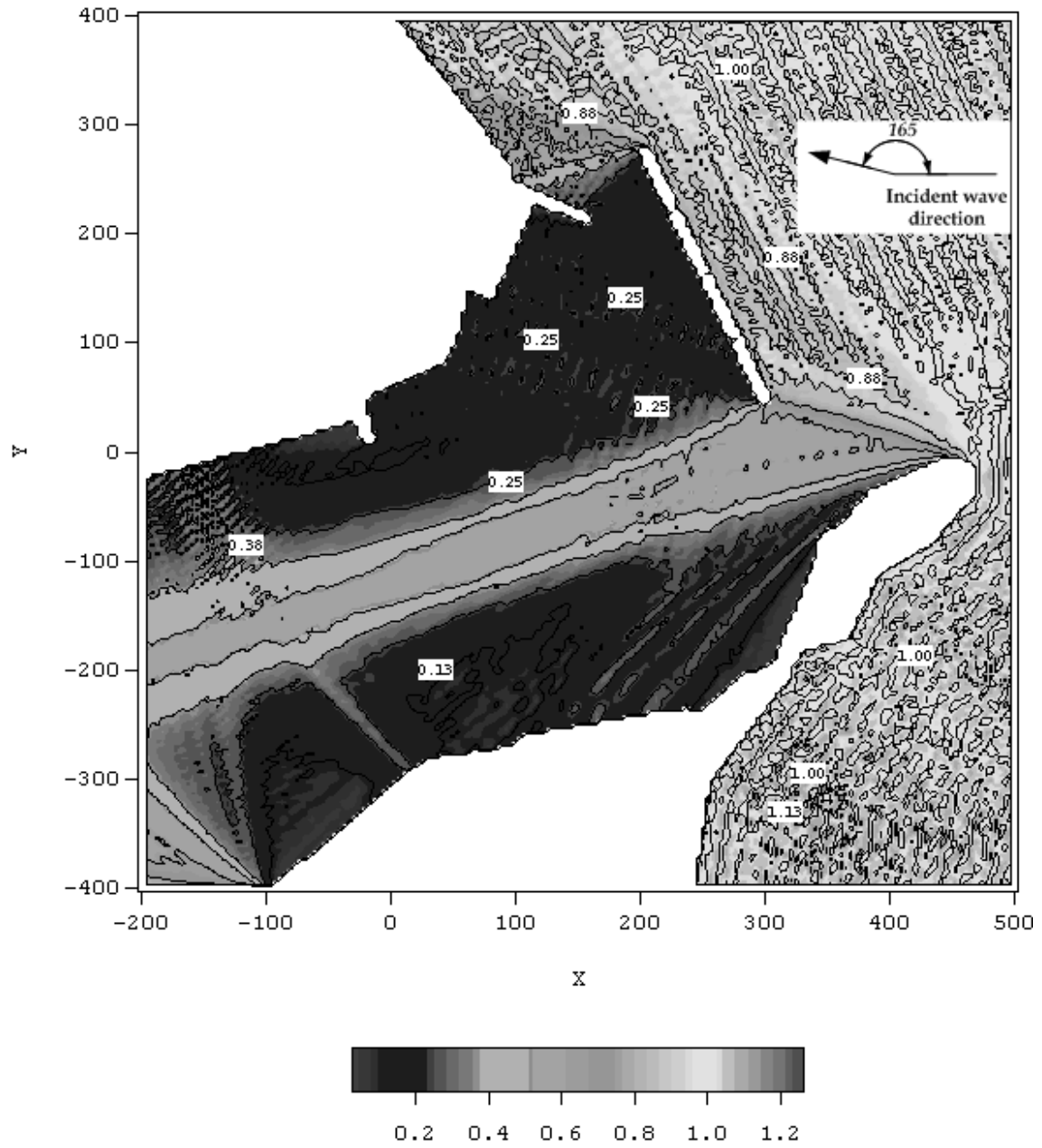
(a) 원전 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.40$ ,  $C_t = 0.20$ ).

Fig. 4.11. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3} = 1.0\text{m}, T_{1/3} = 3.5\text{sec}, S_{\max} = 10)$ .



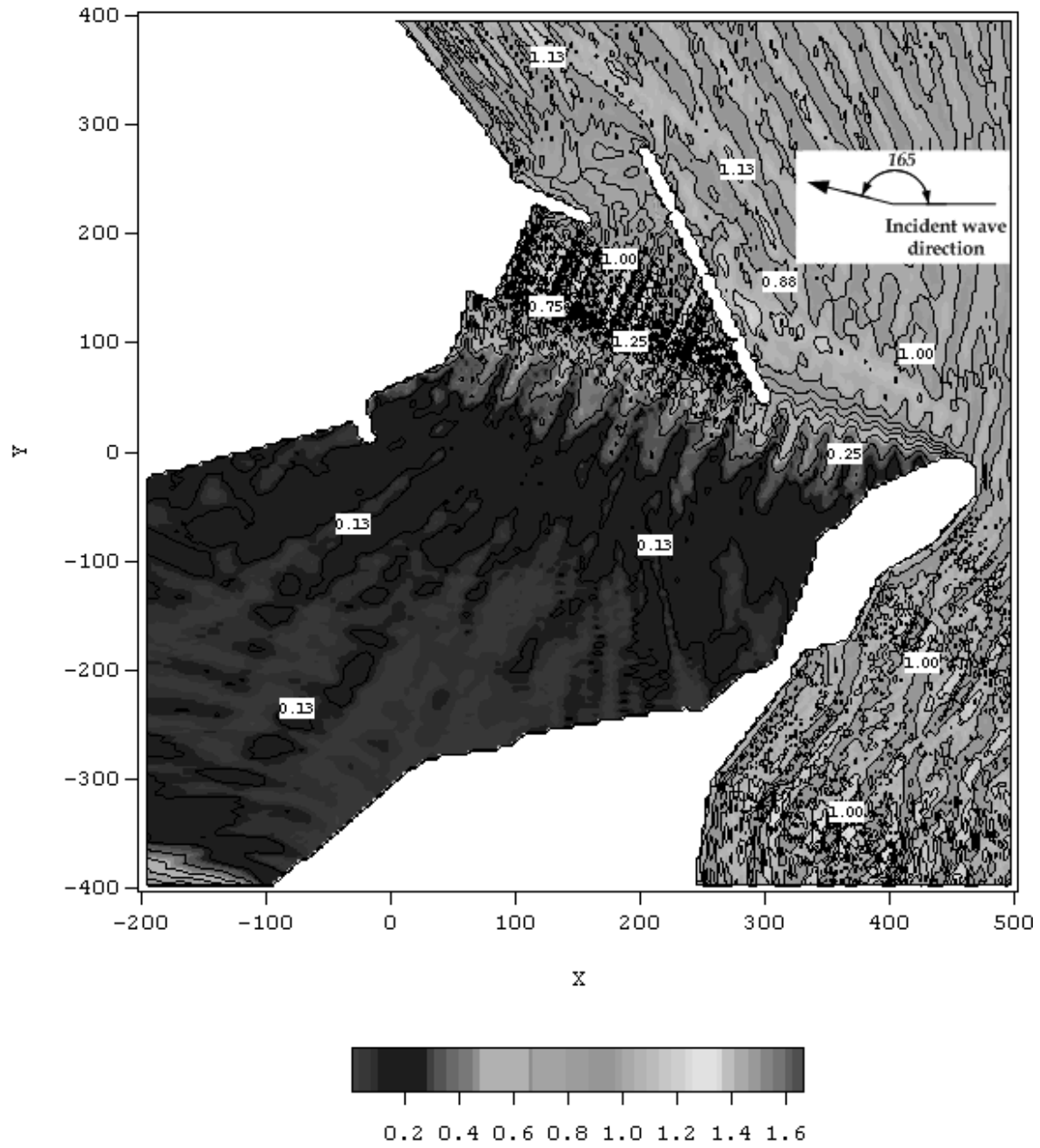
(b) 연직판각형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.60$ ,  $C_t = 0.27$ ).

Fig. 4.11. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3} = 1.0\text{m}, T_{1/3} = 3.5\text{sec}, S_{\text{max}} = 10)$ .



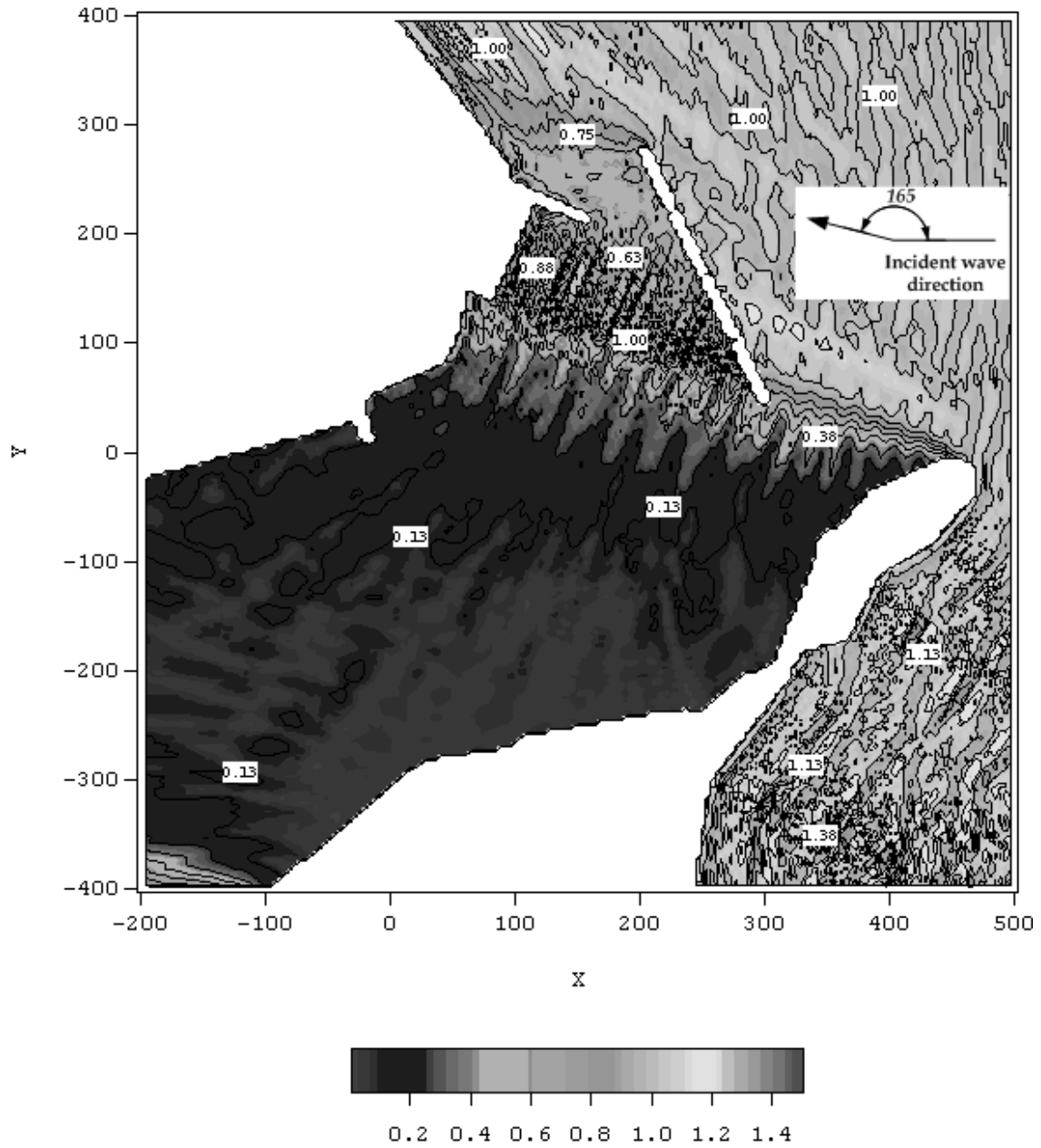
(c) 복합관형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.30$ ,  $C_t = 0.17$ ).

Fig. 4.11. 각 부소파제 의한 파고분포  
( $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ ,  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ ,  $S_{\max} = 10$ ).



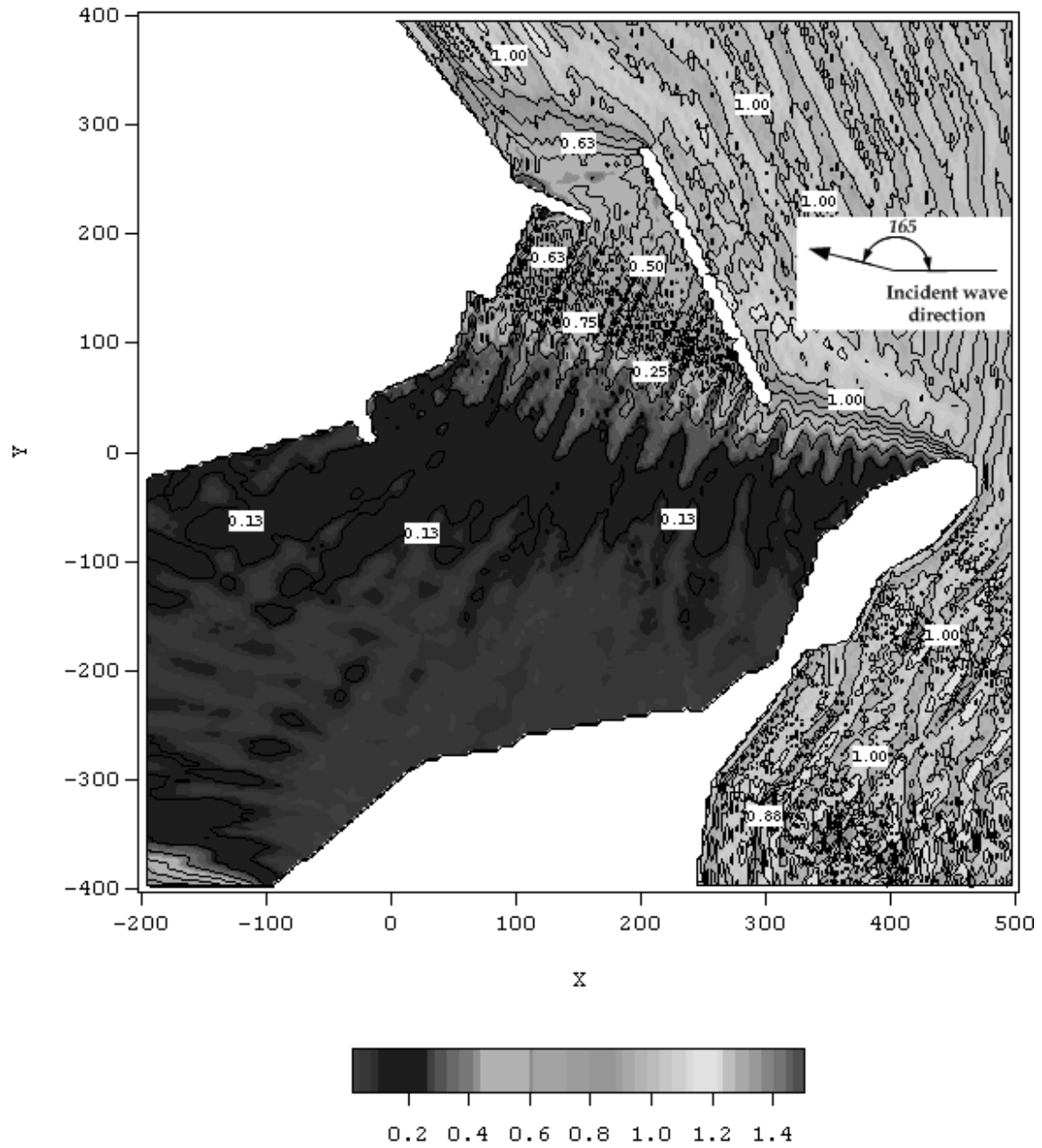
(a) 원전 부소파제에 의한 파고분포( $C_r=0.05$ ,  $C_t=0.80$ ).

Fig. 4.12. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3}=1.0\text{m}, T_{1/3}=5.5\text{sec}, S_{\max}=999)$ .



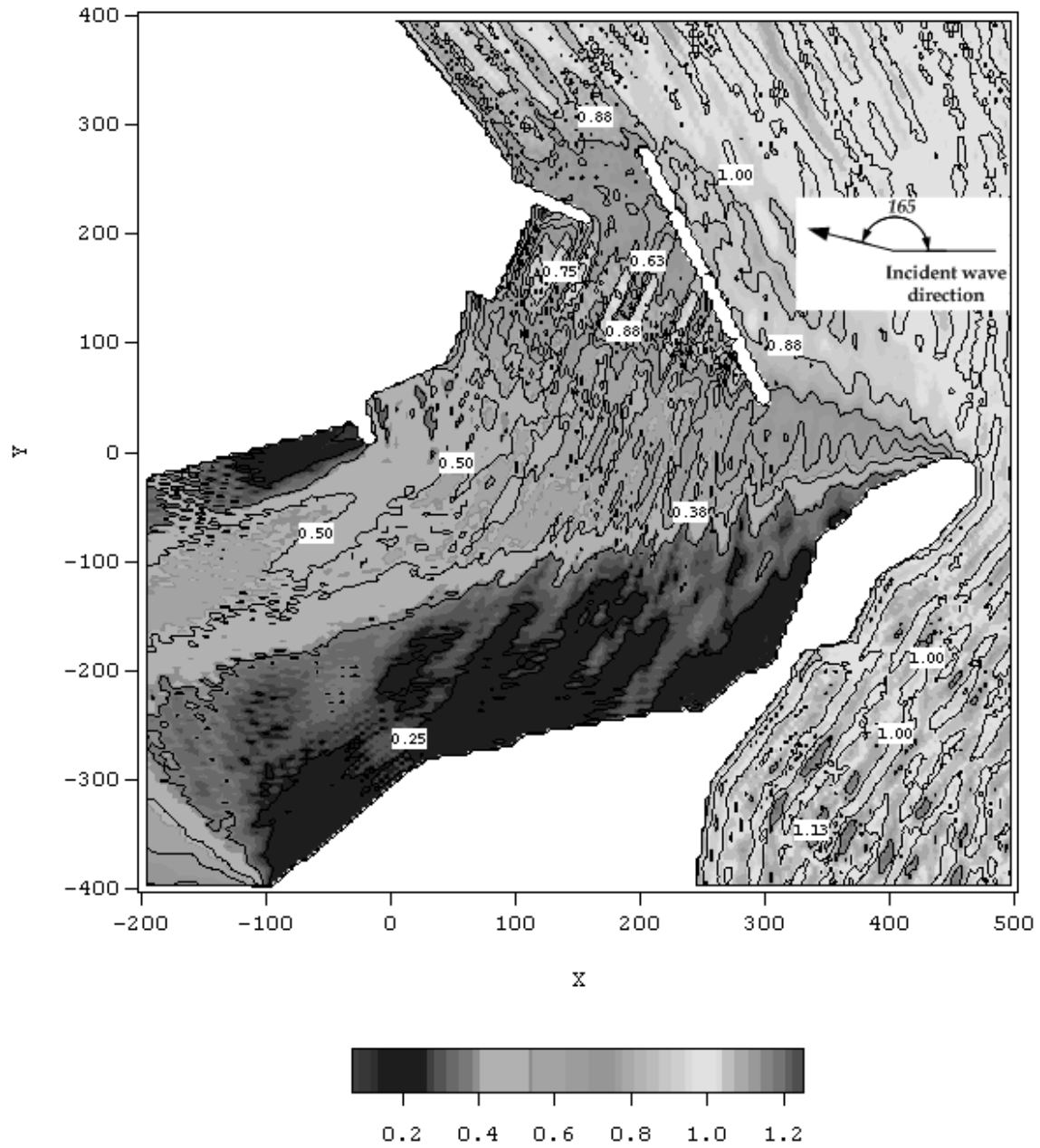
(b) 연직판각형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r=0.15$ ,  $C_t=0.60$ ).

Fig. 4.12. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3} = 1.0\text{m}, T_{1/3} = 5.5\text{sec}, S_{\max} = 999)$ .



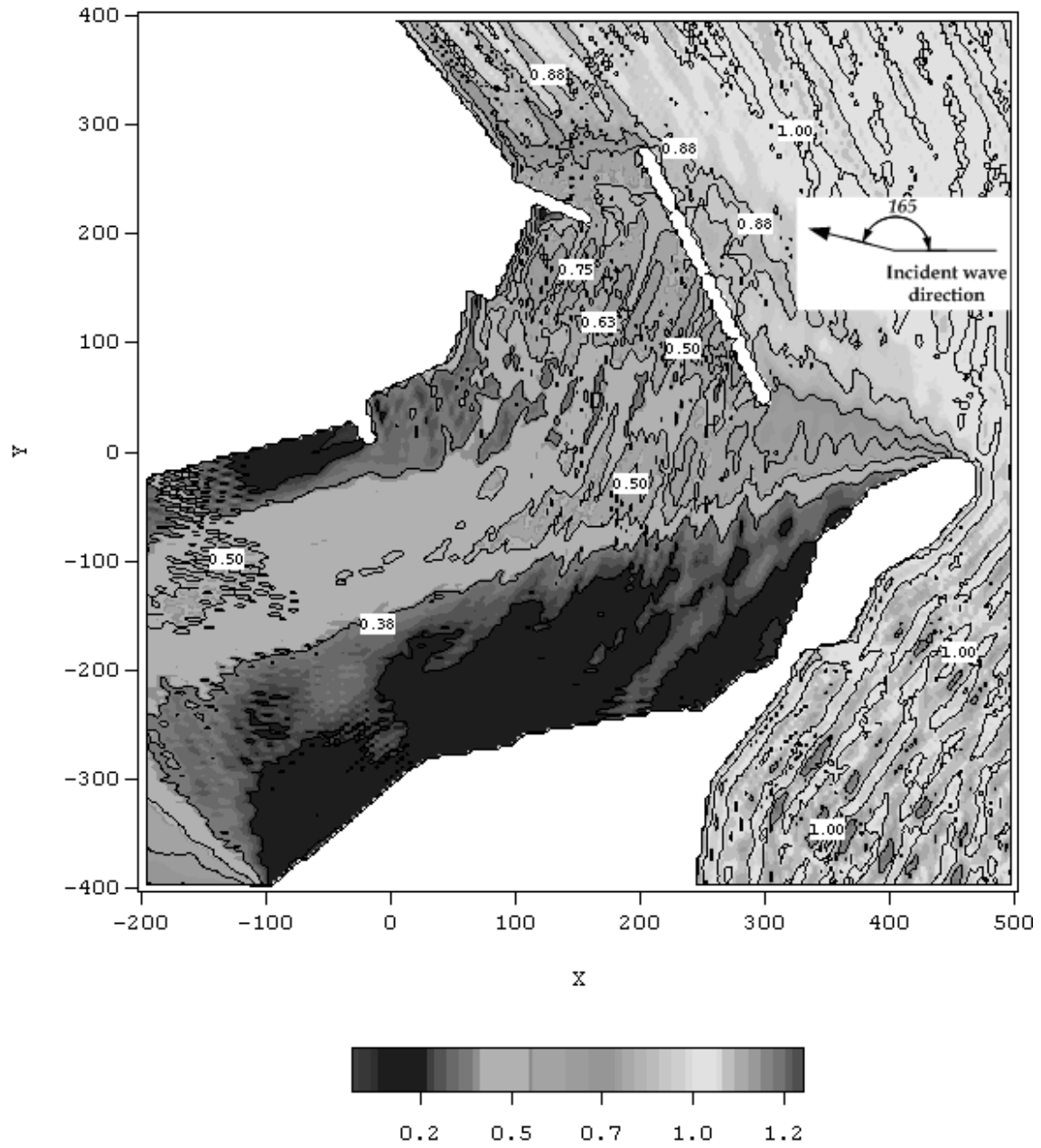
(c) 복합판형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r=0.25$ ,  $C_t=0.50$ ).

Fig. 4.12. 각 부소파제 의한 파고분포  
( $H_{1/3}=1.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=5.5\text{sec}$ ,  $S_{\text{max}}=999$ ).



(a) 원전 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.05$ ,  $C_t = 0.80$ ).

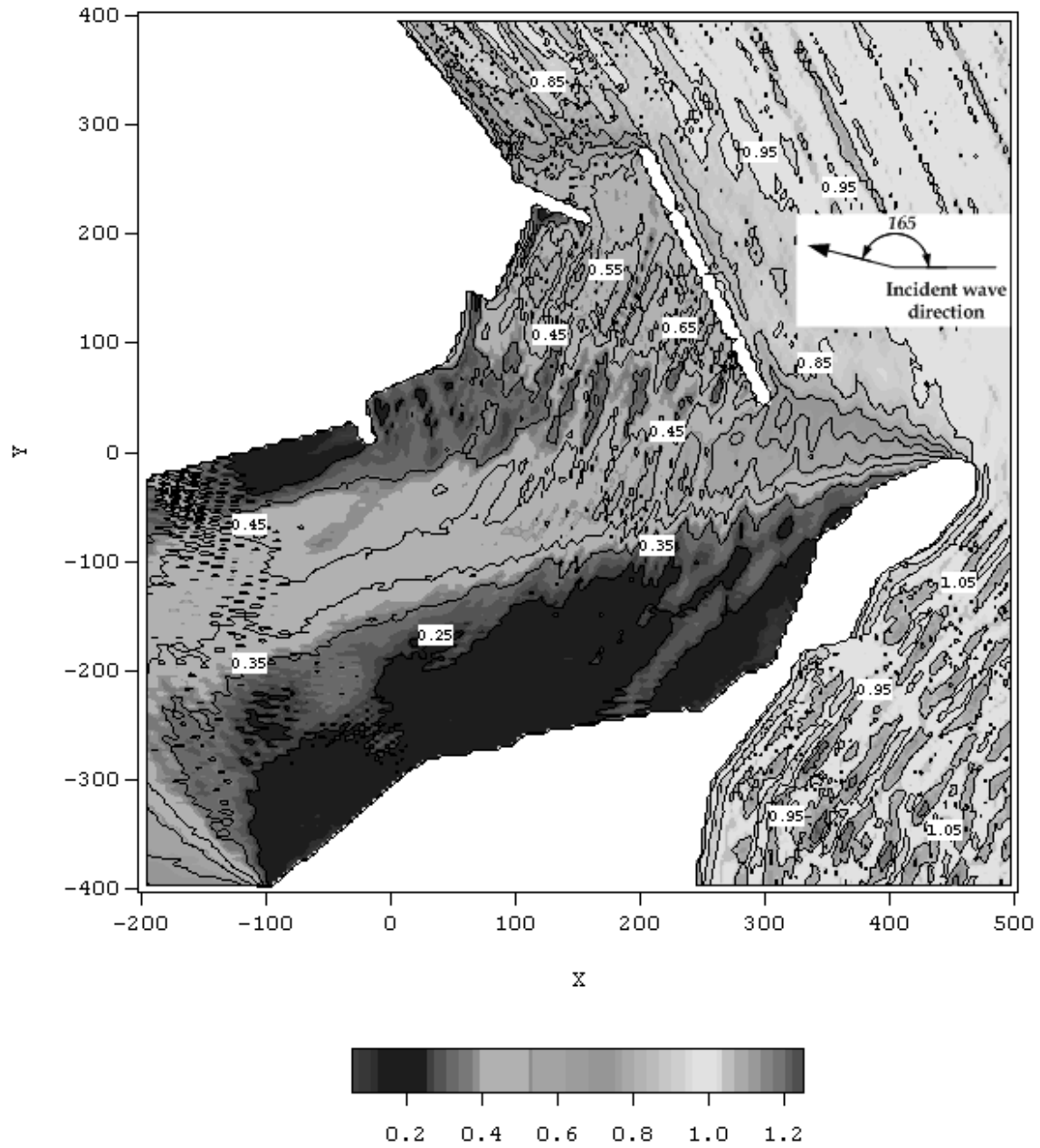
Fig. 4.13. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3} = 1.0\text{m}, T_{1/3} = 5.5\text{sec}, S_{\max} = 10)$ .



(b) 연직판각형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r=0.15$ ,  $C_t=0.60$ ).

Fig. 4.13. 각 부소파제 의한 파고분포(계속)  
 $(H_{1/3} = 1.0\text{m}, T_{1/3} = 5.5\text{sec}, S_{\max} = 10)$ .





(c) 복합관형 부소파제에 의한 파고분포( $C_r = 0.25$ ,  $C_t = 0.50$ ).

Fig. 4.13. 각 부소파제 의한 파고분포  
( $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ ,  $T_{1/3} = 5.5\text{sec}$ ,  $S_{\max} = 10$ ).

# 5. 부소파제의 3차원해석(1)

## 5.1 이론적 배경

전술한 원전 부소파제, 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제에 의한 2차원파랑변형 및 동적응답, 그리고 평면파랑변형에 대한 검토는 기본적으로 부소파제의 3차원적인 파랑변형과 동적거동을 고려할 수 없는 해석법이다.

부소파제가 설치되는 실해역을 고려하면 변동수심, 육역경계 및 부소파제의 3차원적인 거동을 동시에 고려한 해석법이 요구되지만, 현 단계에서는 컴퓨터의 용량상 수치해석에 많은 어려움이 있다. 또한, 실해역에 건설되는 부소파제는 多基로 건설되기 때문에 파랑변형과 동적거동이 간섭효과로 1基의 경우와는 상이할 수 있다. 따라서, 이 장에서는 육역경계가 없는 일정수심의 3차원파동장에 연직운동만을 허용하는 돌핀계류된 2基의 폰툰형 부소파제와 Catenary계류된 2基의 폰툰형 부소파제를 대상으로 그에 따른 파랑변형과 동적거동을 입사파랑의 조건 및 흘수 등을 변화시켜 검토한다.

이 장의 연구를 수행하기 위한 수치해석법은 고유함수전개법과 경계요소법을 병용하는 Hybrid기법이며, 이 연구결과의 타당성을 검증하기 위해 1基의 자유부체와 긴장계류된 폰툰형 부소파제에 대한 井島 등(1975)의 해석결과와 비교·검토한다.

## 5.2 해석이론

### 5.2.1 기본가정 및 경계조건

Fig. 5.1에 나타내는 바와 같이 수심  $h$ 의 해역에 Catenary계류된 2基의 폰툰형 부소파제(우측의 부소파제를 부소파제 I, 좌측의 부소파제를 부소파제 II로 칭한다)가 주파수  $\sigma$ 의 입사파에 의해 주기적인 미소운동을 하는 것으로 하며, 이 때 부소파제 I과 부소파제 II 사이의 연직중심축상에 원점  $O$ 를 둔 Fig. 5.1과 같은 좌표계를 취하는 것으로 한다. 여기서, 돌핀계류된 부소파제의 해석이론은 Catenary계류된 부소파제의 해석법에서 연직운동만을 고려하면 쉽게 유도될 수 있으므로, 이하에서는 Catenary계류된 부소파제에 관해서만 언급한다. 부소파제 I의 장축 및 단축의 길이를 부소파제 II와 동일하게 각각  $2a$ ,  $2b$ , 개구폭을  $2c$ , 흘수를  $qh$  ( $0 < q < 1$ )로 하고, 정지시의 중심위치를 부소파제 I의 경우는  $(x_{G1}, 0, z_{G1})$ , 부소파제 II의 경우

는  $(x_{G2}, 0, z_{G2})$ 로 한다. 운동중의 임의시각  $t$ 에서 중심은 부소파제  $I$ 의 경우에  $(x_1, y_1, z_1)$ 으로, 부소파제  $II$ 의 경우에  $(x_2, y_2, z_2)$ 로 이동하며, 또한 중심주변으로  $x, y, z$ 의 각 축에 관하여 부소파제  $I$ 의 경우는  $\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{13}$ 의 회전을, 부소파제  $II$ 의 경우는  $\delta_{21}, \delta_{22}, \delta_{23}$ 의 회전을 하는 것으로 한다. 이들의 변위와 회전각에 있어서 복소진폭을 각각 부소파제  $I$ 의 경우에  $\xi_1^*, \eta_1^*, \zeta_1^*, \omega_{11}^*, \omega_{12}^*, \omega_{13}^*$ , 부소파제  $II$ 의 경우에  $\xi_2^*, \eta_2^*, \zeta_2^*, \omega_{21}^*, \omega_{22}^*, \omega_{23}^*$ 으로 하면 다음과 같은 관계가 주어진다.

$$\begin{cases} x_i - x_{Gi} = \xi_i^* e^{-i\sigma t}, y_i = \eta_i^* e^{-i\sigma t}, z_i - z_{Gi} = \zeta_i^* e^{-i\sigma t} \\ \delta_{i1} = \omega_{i1}^* e^{-i\sigma t}, \delta_{i2} = \omega_{i2}^* e^{-i\sigma t}, \delta_{i3} = \omega_{i3}^* e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.1)$$

여기서, 부소파제  $I$ 의 경우에 아랫첨자  $i = 1$ , 부소파제  $II$ 의 경우에  $i = 2$ 를 나타낸다.

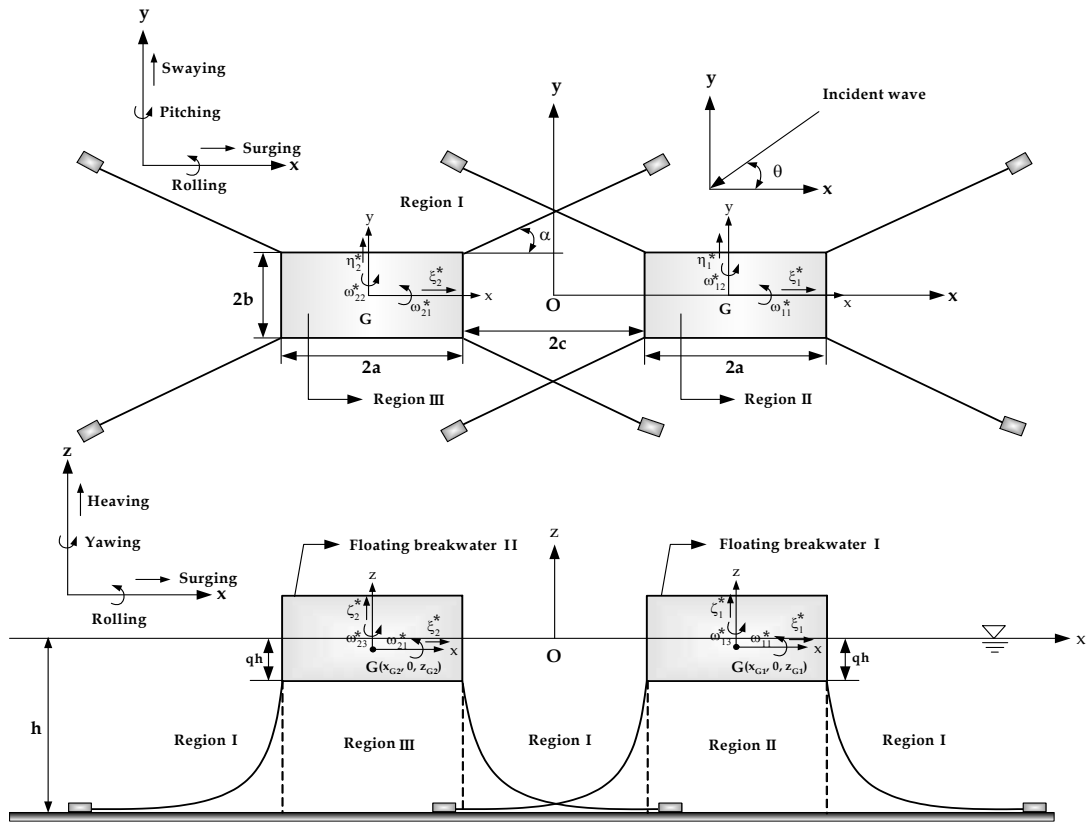


Fig. 5.1. 수치해석 모델과 유체영역.

유체를 비압축·비점성의 완전유체로, 더욱이 파랑운동을 미소진폭파의 운동으로 가정하고, 부소파제  $I$ 과  $II$ 의 측면으로부터 외측의 외역  $I$ 과 부소파제  $I$ 과  $II$ 의 저면하의 내역  $II, III$ 에서 속도포텐셜을 각각  $\phi_j(x, y, z)e^{-i\sigma t}$  ( $j = I, II, III$ )로 하면,  $\phi_j$ 는 다음의 Laplace방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial z^2} = 0, \quad j = I, II, III \quad (5.2)$$

$\phi_j$ 에 대한 부소파제 측면과 저면, 해저면 및 자유수면에서 경계조건은 다음의 식들로 주어진다.

■ 부소파제의 측면 ;

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_I}{\partial x} = -i\sigma \{ \xi_i^* - \omega_{i3}^* y + \omega_{i2}^* (z - z_{Gi}) \}, & x = \pm c, \pm (c + 2a) \\ \frac{\partial \phi_I}{\partial y} = -i\sigma \{ \eta_i^* + \omega_{i3}^* (x - x_{Gi}) - \omega_{i1}^* (z - z_{Gi}) \}, & x = \pm b \end{cases} \quad (5.3)$$

■ 부소파제의 저면 ;

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_{II}}{\partial z} = -i\sigma \{ \zeta_1^* - \omega_{12}^* (x - x_{G1}) + \omega_{11}^* y \}, & z = -qh \\ \frac{\partial \phi_{III}}{\partial z} = -i\sigma \{ \zeta_2^* - \omega_{22}^* (x - x_{G2}) + \omega_{12}^* y \}, & z = -qh \end{cases} \quad (5.4)$$

해저면에서 불투과경계조건은 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0, \quad z = -h, \quad j = I, II, III \quad (5.5)$$

외역  $I$ 에서 자유수면경계조건은 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi_I, z = 0 \quad (5.6)$$

입사파는 다음 식의 실수부분으로 표현되는 파수  $k$ , 진폭  $\zeta_0$ 를 갖고,  $x$ 축과  $\theta$ 의 각도로 입사하는 여현파로 한다.

$$\zeta = \zeta_0 \exp \{-i(kx \cos \theta + ky \sin \theta + \sigma t)\} \quad (5.7)$$

### 5.2.2 속도포텐셜의 전개

자유표면에서 경계조건식(5.6)과 해저에서의 경계조건식(5.5)를 만족하는 외역  $I$ 의 속도포텐셜  $\phi_I$ 은 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_I(x, y, z) = & \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[ \{f_0(x, y) + f_1(x, y)\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(x, y) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \right] \end{aligned} \quad (5.8)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $k$  및  $k_n$ 은 다음의 식으로 주어지는 근이다.

$$k \tanh kh = -k_n h \tan k_n h = \frac{\sigma^2 h}{g}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.9)$$

또한,  $f_0(x, y)$ 는 식(5.7)의 입사파에 대응하는 것으로 다음의 식으로 주어질 수 있고,  $f_1(x, y)$ 는 진행회절산란파성분을,  $f_2^{(n)}(x, y)$ 는 정지회절산란파성분을 각각 나타낸다.

$$f_0(x, y) = -i \exp \{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \quad (5.10)$$

부소파제의 저면에서 조건식(5.4)와 해저에서의 경계조건식(5.5)를 만족하는 내역  $II, III$ 에서의 속도포텐셜  $\phi_{II}, \phi_{III}$ 은 Fourier변환의 적용으로부터 다음의 식과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}
\phi_{II}(x, y, z) = & \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[ \varphi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x, y) \cos \bar{s} (z + qh) \right. \\
& + i \frac{1}{2\bar{q}} \frac{\sigma^2 h}{g} \left\{ \left( -\frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} - \frac{\omega_{11}^* y}{\zeta_0} + \frac{\omega_{12}^* (x - x_{G1})}{\zeta_0} \right) \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{4} \left( \frac{2\zeta_1^*}{\zeta_0} + \frac{\omega_{11}^* y}{\zeta_0} - \frac{\omega_{12}^* (x - x_{G1})}{\zeta_0} \right) \left( \frac{(x - x_{G1})^2 + y^2}{h^2} \right) \right\} \right] \quad (5.11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{III}(x, y, z) = & \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[ \psi_0(x, y) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(x, y) \cos \bar{v} (z + qh) \right. \\
& + i \frac{1}{2\bar{q}} \frac{\sigma^2 h}{g} \left\{ \left( -\frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} - \frac{\omega_{21}^* y}{\zeta_0} + \frac{\omega_{22}^* (x - x_{G2})}{\zeta_0} \right) \left( 1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{4} \left( \frac{2\zeta_2^*}{\zeta_0} + \frac{\omega_{21}^* y}{\zeta_0} - \frac{\omega_{22}^* (x - x_{G2})}{\zeta_0} \right) \left( \frac{(x - x_{G2})^2 + y^2}{h^2} \right) \right\} \right] \quad (5.12)
\end{aligned}$$

여기서,  $s, v$ 는 정수,  $\bar{s} = s\pi/\bar{q}h$ ,  $\bar{v} = v\pi/\bar{q}h$ ,  $\bar{q} = 1 - q$ 이다.

식(5.8), (5.11), (5.12)에서  $f_1(x, y), f_2^{(n)}(x, y) (n = 1, 2, 3, \dots); \varphi_0(x, y), \varphi_s(x, y) (s = 1, 2, 3, \dots); \psi_0(x, y), \psi_v(x, y) (v = 1, 2, 3, \dots)$ 는 각각의 속도포텐셜을 식(5.2)에 대입함으로 다음의 Helmholtz방정식을 만족하여야 하는 미지함수로 주어진다.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 f_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_1}{\partial y^2} + k^2 f_1 = 0 \\ \frac{\partial^2 f_2^{(n)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_2^{(n)}}{\partial y^2} - k_n^2 f_2^{(n)} = 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_s}{\partial y^2} - \bar{s}^2 \varphi_s = 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \psi_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_v}{\partial y^2} - \bar{v}^2 \psi_v = 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

### 5.2.3 Green함수에 의한 미지수의 표시

Fig. 5.2(a), (b), (c)와 같이 경계선을  $D, D_1, D_2$ 로 하고, 각각 경계선상의 점을  $(\xi, \eta), (\xi_1, \eta_1), (\xi_2, \eta_2)$ , 외역  $I$ 과 내역  $II, III$ 의 임의점을 각각  $(x, y)$ 로 나타내고, 각각 경계선상과 영역상의 두 점간의 거리  $r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$ ,  $r_1 = \sqrt{(x - \xi_1)^2 + (y - \eta_1)^2}$ ,  $r_2 = \sqrt{(x - \xi_2)^2 + (y - \eta_2)^2}$ 를 사용하여 각각  $r \rightarrow 0, r_1 \rightarrow 0, r_2 \rightarrow 0$ 에서  $\log r, \log r_1, \log r_2$ 의 오더의 특이성을 갖고, 각각  $r \rightarrow \infty, r_1 \rightarrow \infty, r_2 \rightarrow \infty$ 에서 Sommerfeld의 Radiation condition을 만족하는 식(5.13), (5.14), (5.15)의 특해로서의 Green함수는  $f_1, f_2^{(n)}; \varphi_0, \varphi_s; \psi_0, \psi_v$ 에 대해서 각각  $H_0^{(1)}(kr), K_0(k_n r); \log(1/kr_1), K_0(\bar{s}r_1); \log(1/kr_2), K_0(\bar{v}r_2)$ 로 주어진다. 여기서,  $H_0^{(1)}$ 은 제1종 Hankel함수,  $K_0$ 는 변형Bessel함수이다. 따라서, 영역  $I, II, III$ 상의 임의점  $(x, y)$ 에서 미지함수는 Green정리에 의하여 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\phi_m(x, y) = \frac{l}{2} \int_Q \left[ \phi_m(\xi, \eta) \frac{\partial G}{\partial n} - k G \frac{\partial \phi_m(\xi, \eta)}{k \partial n} \right] ds \quad (5.16)$$

여기서,

$$\begin{cases} \phi_m = f_1, & G = -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(kr), \quad l = -1, \quad Q = D \\ \phi_m = f_2^{(n)}, & G = -\frac{1}{\pi} K_0(k_n r), \quad l = -1, \quad Q = D \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_m = \varphi_0, G = -\frac{1}{\pi} \log\left(\frac{1}{kr}\right), l = 1, Q = D_1 \\ \phi_m = \varphi_s, G = -\frac{1}{\pi} K_0(\bar{s}r), l = 1, Q = D_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_m = \psi_0, G = -\frac{1}{\pi} \log\left(\frac{1}{kr}\right), l = 1, Q = D_2 \\ \phi_m = \psi_v, G = -\frac{1}{\pi} K_0(\bar{v}r), l = 1, Q = D_2 \end{cases}$$

그리고,  $n$ 은 경계선  $D, D_1, D_2$ 에 대한 외향법선을 나타낸다.

외역  $I$  및 내역  $II, III$ 상의  $(x, y)$ 를 각각 경계상의 고정점  $(\xi', \eta'), (\xi'_1, \eta'_1), (\xi'_2, \eta'_2)$ 로 근접시키면, 식(5.16)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_m(\xi', \eta') = l \int_Q \left[ \phi_m(\xi, \eta) \frac{\partial G}{\partial n} - kG \frac{\partial \phi_m(\xi, \eta)}{k \partial n} \right] ds \quad (5.17)$$

여기서,

$$\begin{cases} \phi_m = f_1, G = -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(kR), l = -1, Q = D \\ \phi_m = f_2^{(n)}, G = -\frac{1}{\pi} K_0(k_n R), l = -1, Q = D \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_m = \varphi_0, G = -\frac{1}{\pi} \log\left(\frac{1}{kR_1}\right), l = 1, Q = D_1 \\ \phi_m = \varphi_s, G = -\frac{1}{\pi} K_0(\bar{s}R_1), l = 1, Q = D_1 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \phi_m = \psi_0, & G = -\frac{1}{\pi} \log \left( \frac{1}{kR_2} \right), l = 1, & Q = D_2 \\ \phi_m = \psi_v, & G = -\frac{1}{\pi} K_0(\bar{v} R_2), & l = 1, & Q = D_2 \end{cases}$$

$$\text{그리고, } R = \sqrt{(\xi - \xi')^2 + (\eta - \eta')^2}, R_1 = \sqrt{(\xi_1 - \xi'_1)^2 + (\eta_1 - \eta'_1)^2}, R_2 = \sqrt{(\xi_2 - \xi'_2)^2 + (\eta_2 - \eta'_2)^2}.$$

$f_1, f_2^{(n)}; \varphi_0, \varphi_s; \psi_0, \psi_v$ 의 경계  $D, D_1, D_2$ 에 있어서 법선미분치를 다음과 같이 둔다.

$$\begin{cases} \bar{f}_1(\xi, \eta) = \frac{\partial f_1(\xi, \eta)}{k \partial n} \\ \bar{f}_2^{(n)}(\xi, \eta) = \frac{\partial f_2^{(n)}(\xi, \eta)}{k \partial n} \end{cases} \quad (5.18a)$$

$$\begin{cases} \bar{\varphi}_0(\xi_1, \eta_1) = \frac{\partial \varphi_0(\xi_1, \eta_1)}{k \partial n} \\ \bar{\varphi}_s(\xi_1, \eta_1) = \frac{\partial \varphi_s(\xi_1, \eta_1)}{k \partial n} \end{cases} \quad (5.18b)$$

$$\begin{cases} \bar{\psi}_0(\xi_2, \eta_2) = \frac{\partial \psi_0(\xi_2, \eta_2)}{k \partial n} \\ \bar{\psi}_v(\xi_2, \eta_2) = \frac{\partial \psi_v(\xi_2, \eta_2)}{k \partial n} \end{cases} \quad (5.18c)$$

또한,  $D$ 를  $N$ 개의 점  $(\xi_j, \eta_j) (j = 1, 2, 3, \dots, N)$ 으로  $N$ 개의 소요소  $\Delta s_j = \sqrt{(\xi_{j+1} - \xi_{j-1})^2 + (\eta_{j+1} - \eta_{j-1})^2}/2$ 으로,  $D_1$ 을  $L$ 개의 점  $(\xi_j^{(1)}, \eta_j^{(1)}) (j = 1, 2, 3, \dots, L; (\xi_1, \eta_1) \equiv (\xi^{(1)}, \eta^{(1)}))$ 으로  $L$ 개의 소요소  $\Delta s_j^{(1)} = \sqrt{(\xi_{j+1}^{(1)} - \xi_{j-1}^{(1)})^2 + (\eta_{j+1}^{(1)} - \eta_{j-1}^{(1)})^2}/2$  ( $\Delta s_1 \equiv \Delta s^{(1)}$ )으로,  $D_2$ 를  $D_1$ 과 동일하게  $L$ 개의 점  $(\xi_j^{(2)}, \eta_j^{(2)}) (j = 1, 2, 3, \dots, L; (\xi_2, \eta_2) \equiv (\xi^{(2)}, \eta^{(2)}))$ 으로  $L$ 개의 소

요소  $\Delta s_j^{(2)} = \sqrt{(\xi_{j+1}^{(2)} - \xi_{j-1}^{(2)})^2 + (\eta_{j+1}^{(2)} - \eta_{j-1}^{(2)})^2} / 2$  ( $\Delta s_2 \equiv \Delta s^{(2)}$ ) 으로 각각 분할하고, 각각  $(\xi, \eta)$ ,  $(\xi_1, \eta_1)$ ,  $(\xi_2, \eta_2) \rightarrow (i)$  로 동일하게 표기하여, 각각  $(\xi, \eta)$ ,  $(\xi_1, \eta_1)$ ,  $(\xi_2, \eta_2) \rightarrow (j)$  로 동일하게 표기하여 이산화하면 식(5.17)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

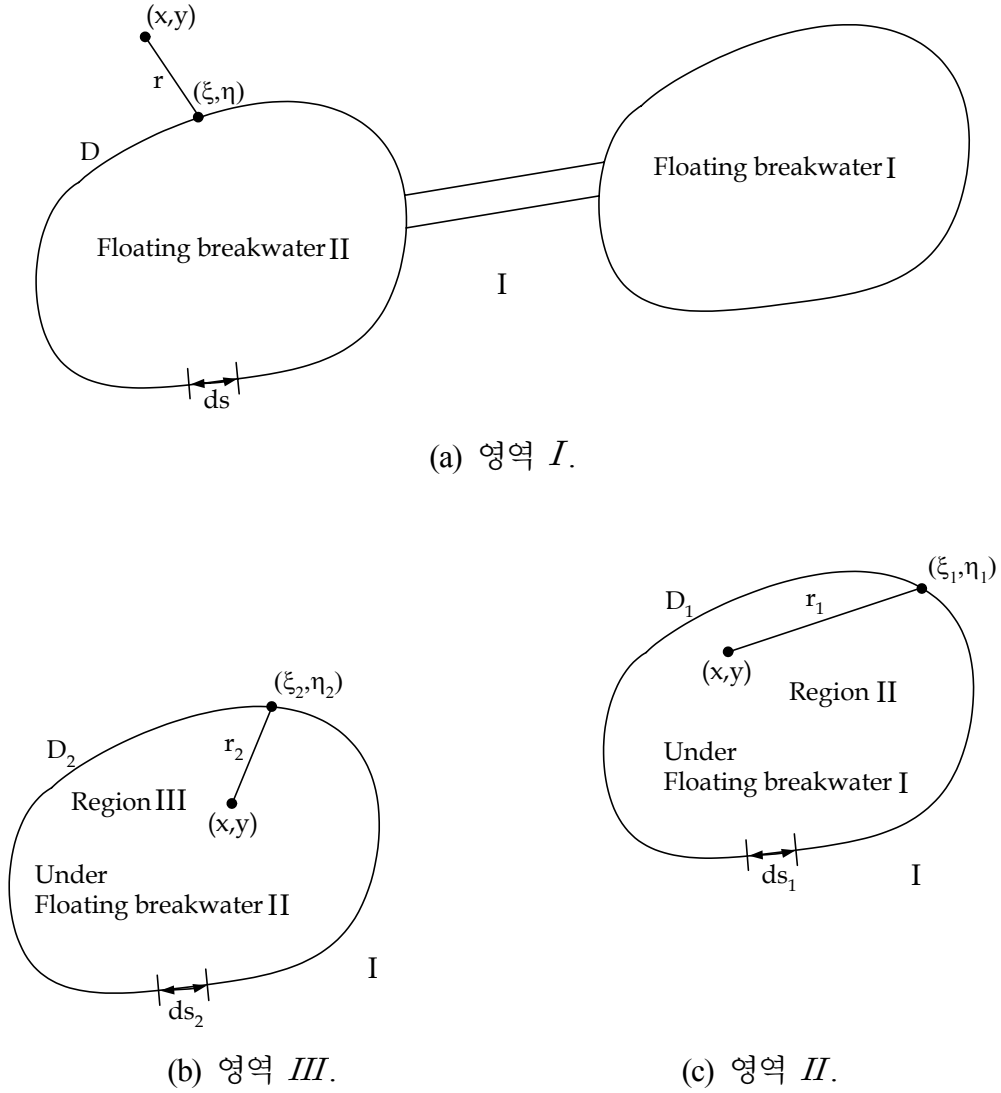


Fig. 5.2. 각 유체영역의 경계상에서의 좌표계.

$$\begin{cases} f_1(i) = - \sum_{j=1}^N [f_1(j) \bar{A}_{ij} - \bar{f}_1(j) A_{ij}] \\ f_2^{(n)}(i) = - \sum_{j=1}^N [f_2^{(n)}(j) \bar{B}_{ij} - \bar{f}_2^{(n)}(j) B_{ij}] \end{cases} \quad (5.19)$$

$$\begin{cases} \varphi_0(i) = \sum_{j=1}^L [\varphi_0(j) \bar{C}_{ij} - \bar{\varphi}_0(j) C_{ij}] \\ \varphi_s(i) = \sum_{j=1}^L [\varphi_s(j) \bar{D}_{ij} - \bar{\varphi}_s(j) D_{ij}] \end{cases} \quad (5.20)$$

$$\begin{cases} \psi_0(i) = \sum_{j=1}^L [\psi_0(j) \bar{E}_{ij} - \bar{\psi}_0(j) E_{ij}] \\ \psi_v(i) = \sum_{j=1}^L [\psi_v(j) \bar{F}_{ij} - \bar{\psi}_v(j) F_{ij}] \end{cases} \quad (5.21)$$

여기서,

$$\begin{cases} A_{ij} = \int_{\Delta s_j} \left( -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(k R_{ij}) \right) k ds \\ \bar{A}_{ij} = \int_{\Delta s_j} \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(k R_{ij}) \right) ds \end{cases} \quad (5.22)$$

$$\begin{cases} B_{ij} = \int_{\Delta s_j} \left( -\frac{K_0(k_n R_{ij})}{\pi} \right) k ds \\ \bar{B}_{ij} = \int_{\Delta s_j} \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{K_0(k_n R_{ij})}{\pi} \right) ds \end{cases} \quad (5.23)$$

$$\begin{cases} C_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(1)}} \left( -\frac{\log(1/kR_{ij}^{(1)})}{\pi} \right) k ds_1 \\ \bar{C}_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(1)}} \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{\log(1/kR_{ij}^{(1)})}{\pi} \right) ds_1 \end{cases} \quad (5.24)$$

$$\begin{cases} D_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(1)}} \left( -\frac{K_0(\bar{s} R_{ij}^{(1)})}{\pi} \right) k ds_1 \\ \bar{D}_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(1)}} \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{K_0(\bar{s} R_{ij}^{(1)})}{\pi} \right) ds_1 \end{cases} \quad (5.25)$$

$$\begin{cases} E_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(2)}} \left( -\frac{\log(1/kR_{ij}^{(2)})}{\pi} \right) k ds_2 \\ \bar{E}_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(2)}} \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{\log(1/kR_{ij}^{(2)})}{\pi} \right) ds_2 \end{cases} \quad (5.26)$$

$$\begin{cases} F_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(2)}} \left( -\frac{K_0(\bar{v} R_{ij}^{(2)})}{\pi} \right) k ds_2 \\ \bar{F}_{ij} = \int_{\Delta s_j^{(2)}} \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{K_0(\bar{v} R_{ij}^{(2)})}{\pi} \right) k ds_2 \end{cases} \quad (5.27)$$

$$\begin{cases} R_{ij} = \sqrt{(\xi_i - \xi_j)^2 + (\eta_i - \eta_j)^2} \\ R_{ij}^{(1)} = \sqrt{(\xi_i^{(1)} - \xi_j^{(1)})^2 + (\eta_i^{(1)} - \eta_j^{(1)})^2} \\ R_{ij}^{(2)} = \sqrt{(\xi_i^{(2)} - \xi_j^{(2)})^2 + (\eta_i^{(2)} - \eta_j^{(2)})^2} \end{cases} \quad (5.28)$$

식(5.19), (5.20), (5.21)의 결과로부터 경계선  $D, D_1, D_2$  상에 있어서 다음의 대수연립 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^N \{ \alpha_{ij}^{(0)} f_1(j) - A_{ij} \bar{f}_1(j) \} = 0 \\ \sum_{j=1}^N \{ \alpha_{ij}^{(n)} f_2^{(n)}(j) - B_{ij} \bar{f}_2^{(n)}(j) \} = 0 \end{array} \right. \quad (5.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^L \{ \beta_{ij}^{(0)} \varphi_0(j) - C_{ij} \bar{\varphi}_0(j) \} = 0 \\ \sum_{j=1}^L \{ \beta_{ij}^{(s)} \varphi_s(j) - D_{ij} \bar{\varphi}_s(j) \} = 0 \end{array} \right. \quad (5.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^L \{ \omega_{ij}^{(0)} \psi_0(j) - E_{ij} \bar{\psi}_0(j) \} = 0 \\ \sum_{j=1}^L \{ \omega_{ij}^{(v)} \psi_v(j) - F_{ij} \bar{\psi}_v(j) \} = 0 \end{array} \right. \quad (5.31)$$

여기서, 다음과 같이 정의한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{ij}^{(0)} = \delta_{ij} + \bar{A}_{ij} \\ \alpha_{ij}^{(n)} = \delta_{ij} + \bar{B}_{ij} \end{array} \right. \quad (5.32a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{ij}^{(0)} = -\delta_{ij} + \bar{C}_{ij} \\ \beta_{ij}^{(s)} = -\delta_{ij} + \bar{D}_{ij} \end{array} \right. \quad (5.32a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{ij}^{(0)} = -\delta_{ij} + \bar{E}_{ij} \\ \omega_{ij}^{(n)} = -\delta_{ij} + \bar{F}_{ij} \end{array} \right. \quad (5.32c)$$

Green공식으로부터 외역  $I$ , 내역  $II, III$ 의 임의점  $(x, y)$ 에 있어서  $f_1, f_2^{(n)}; \varphi_0, \varphi_s; \psi_0, \psi_v$ 의 값은 각각  $D, D_1, D_2$ 상의 값  $f_1, f_2^{(n)}; \varphi_0, \varphi_s; \psi_0, \psi_v$ 와  $\bar{f}_1, \bar{f}_2^{(n)}; \bar{\varphi}_0, \bar{\varphi}_s; \bar{\psi}_0, \bar{\psi}_v$ 의 값으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} f_1(x, y) = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N [\bar{A}_{Xj} f_1(j) - A_{Xj} \bar{f}_1(j)] \\ f_2^{(n)}(x, y) = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N [\bar{B}_{Xj} f_2^{(n)}(j) - B_{Xj} \bar{f}_2^{(n)}(j)] \end{cases} \quad (5.33)$$

$$\begin{cases} \varphi_0(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{C}_{Xj} \varphi_0(j) - C_{Xj} \bar{\varphi}_0(j)] \\ \varphi_s(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{D}_{Xj} \varphi_s(j) - D_{Xj} \bar{\varphi}_s(j)] \end{cases} \quad (5.34)$$

$$\begin{cases} \psi_0(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{E}_{Xj} \psi_0(j) - E_{Xj} \bar{\psi}_0(j)] \\ \psi_v(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{F}_{Xj} \psi_v(j) - F_{Xj} \bar{\psi}_v(j)] \end{cases} \quad (5.35)$$

여기서,  $A_{Xj}, \bar{A}_{Xj}, \dots$  등은 식(5.22)~(5.27)의  $A_{ij}, \bar{A}_{ij}, \dots$  등에 있어서  $(\xi_i, \eta_i)$ 의 대신에  $(x, y)$ 로 둔 것을 나타내고, 또한  $f_1(j), f_2^{(n)}(j), \dots$  등은  $f_1(\xi_j, \eta_j), f_2^{(n)}(\xi_j, \eta_j), \dots$  등을 나타내는 것으로 한다.

#### 5.2.4 부소파제에 작용하는 유체력

유체역  $I, II, III$ 에서 부소파제의 측면 및 저면에 작용하는 유체압력  $p_j (j = I, II, III)$ 는 Bernoulli정리를 적용하면 속도포텐셜  $\phi_j (j = I, II, III)$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} p_I = i\rho\sigma\phi_I(\xi, \eta, z)e^{-i\sigma t} \\ p_{II} = i\rho\sigma\phi_{II}(x, y, -qh)e^{-i\sigma t} \\ p_{III} = i\rho\sigma\phi_{III}(x, y, -qh)e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.36)$$

위의 식에 식(5.8), (5.11), (5.12)를 대입하면 다음을 얻는다.

$$\frac{p_I}{\rho g \zeta_0} = \begin{cases} i \left[ \{f_0(\xi, \eta) + f_1(\xi, \eta)\} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(\xi, \eta) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.37)$$

$$\frac{p_{II}}{\rho g \zeta_0} = \begin{cases} i \left[ \varphi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(x, y) \right. \\ \left. + i \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left\{ \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} + \left( \frac{2\zeta_1^*}{\zeta_0} + \frac{\omega_{11}^* y}{\zeta_0} - \frac{\omega_{12}^* (x - x_{G1})}{\zeta_0} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \left( \frac{(x - x_{G1})^2 + y^2}{4(\bar{q}h)^2} - 1 \right) \right\} \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.38)$$

$$\frac{p_{III}}{\rho g \zeta_0} = \begin{cases} i \left[ \psi_0(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \psi_s(x, y) \right. \\ \left. + i \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left\{ \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} + \left( \frac{2\zeta_2^*}{\zeta_0} + \frac{\omega_{21}^* y}{\zeta_0} - \frac{\omega_{22}^* (x - x_{G2})}{\zeta_0} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \left( \frac{(x - x_{G2})^2 + y^2}{4(\bar{q}h)^2} - 1 \right) \right\} \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.39)$$

부소파제  $I, II$ 의 저면을 각각  $M$ 개의 미소면적  $\Delta\alpha_p$  ( $p = 1, 2, \dots, M$ ),  $\Delta\alpha_q$  ( $q = 1, 2, \dots, M$ )으로 분할하고, 면적요소의 중심점을 각각  $(x_p, y_p)$ ,  $(x_q, y_q)$ 로 하여 식(5.34), (5.35)를 사용하면  $\varphi_0(x_p, y_p)$ ,  $\varphi_s(x_p, y_p)$ 는  $D_1$ 상의  $\varphi_0(j)$ ,  $\varphi_s(j)$ ;

$\bar{\varphi}_0(j), \bar{\varphi}_s(j)$ 에 의해, 그리고  $\psi_0(x_q, y_q), \psi_v(x_q, y_q)$ 는  $D_2$ 상의  $\psi_0(j), \psi_v(j)$ ;  $\bar{\psi}_0(j), \bar{\psi}_v(j)$ 에 의해 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \varphi_0(x_p, y_p) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{C}_{pj} \varphi_0(j) - C_{pj} \bar{\varphi}_0(j)] \\ \varphi_s(x_p, y_p) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{D}_{pj} \varphi_s(j) - D_{pj} \bar{\varphi}_s(j)] \end{cases} \quad (5.40)$$

$$\begin{cases} \psi_0(x_q, y_q) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{E}_{qj} \psi_0(j) - E_{qj} \bar{\psi}_0(j)] \\ \psi_v(x_q, y_q) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L [\bar{F}_{qj} \psi_v(j) - F_{qj} \bar{\psi}_v(j)] \end{cases} \quad (5.41)$$

따라서, 부소파제에 작용하는 유체압력  $p_{II}, p_{III}$ 의  $x, y, z$ 방향의 각각의 합력  $P_{Xi}, P_{Yi}, P_{Zi}$  및 중심주변의 모멘트  $T_{Xi}, T_{Yi}, T_{Zi}$ 는 다음의 결과로 주어질 수 있다. 여기서, 부소파제  $I$ 의 경우에  $i = 1$ , 부소파제  $II$ 의 경우에  $i = 2$ 를 나타낸다.

$$\frac{P_{X1}}{\rho g \zeta_0 h^2} = -\frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] k \Delta \eta_j e^{-i\sigma t} \quad (5.42a)$$

$$\frac{P_{X2}}{\rho g \zeta_0 h^2} = -\frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] k \Delta \eta_j e^{-i\sigma t} \quad (5.42b)$$

$$\frac{P_{Y1}}{\rho g \zeta_0 h^2} = \frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] k \Delta \xi_j e^{-i\sigma t} \quad (5.43a)$$

$$\frac{P_{Y2}}{\rho g \zeta_0 h^2} = \frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] k \Delta \xi_j e^{-i\sigma t} \quad (5.43b)$$



$$\frac{P_{Z1}}{\rho g \zeta_0 h^2} = \begin{cases} \frac{i}{h^2} \sum_{p=1}^M \left[ \varphi_0(p) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(p) \right] \Delta \alpha_p e^{-i\sigma t} \\ - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} C_1 - \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} C_2 \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.44a)$$

$$\frac{P_{Z2}}{\rho g \zeta_0 h^2} = \begin{cases} \frac{i}{h^2} \sum_{q=1}^M \left[ \psi_0(q) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(q) \right] \Delta \alpha_q e^{-i\sigma t} \\ - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} C_1' - \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} C_2' \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.44b)$$

$$\frac{T_{X1}}{\rho g \zeta_0 h^3} = \begin{cases} - \frac{i}{h} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n \right] \Delta \xi_j e^{-i\sigma t} \\ + \frac{i}{h^3} \sum_{p=1}^M \left[ \varphi_0(p) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(p) \right] y_p \Delta \alpha_p e^{-i\sigma t} \\ - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} B_x e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.45a)$$

$$\frac{T_{X2}}{\rho g \zeta_0 h^3} = \begin{cases} - \frac{i}{h} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n \right] \Delta \xi_j e^{-i\sigma t} \\ + \frac{i}{h^3} \sum_{q=1}^M \left[ \psi_0(q) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(q) \right] y_q \Delta \alpha_q e^{-i\sigma t} \\ - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} B_x' e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.45b)$$

$$\frac{T_{Y1}}{\rho g \zeta_0 h^3} = \begin{cases} -\frac{i}{h} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n \right] \Delta \eta_j e^{-i\sigma t} \\ -\frac{i}{h^3} \sum_{p=1}^M \left[ \varphi_0(p) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(p) \right] (x_p - x_{G1}) \Delta \alpha_p e^{-i\sigma t} \\ + \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} B_y^{(1)} - \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} B_y^{(2)} \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.46a)$$

$$\frac{T_{Y2}}{\rho g \zeta_0 h^3} = \begin{cases} -\frac{i}{h} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0' + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n' \right] \Delta \eta_j e^{-i\sigma t} \\ -\frac{i}{h^3} \sum_{q=1}^M \left[ \psi_0(q) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(q) \right] (x_q - x_{G2}) \Delta \alpha_q e^{-i\sigma t} \\ + \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} B_y'^{(1)} - \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} B_y'^{(2)} \right] e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.46b)$$

$$\frac{T_{Z1}}{\rho g \zeta_0 h^3} = \begin{cases} \frac{i}{h^2} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ \{f_0(j) + f_1(j)\} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] \\ \cdot \{(\xi_j - x_{G1}) \Delta \xi_j + \eta_j \Delta \eta_j\} e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.47a)$$

$$\frac{T_{Z2}}{\rho g \zeta_0 h^3} = \begin{cases} \frac{i}{h^2} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ \{f_0(j) + f_1(j)\} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] \\ \cdot \{(\xi_j - x_{G2}) \Delta \xi_j + \eta_j \Delta \eta_j\} e^{-i\sigma t} \end{cases} \quad (5.47b)$$

여기서,

$$A_0 = \frac{\sinh kh - \sinh k h \bar{q}}{kh \cosh kh}$$

$$A_n = \frac{\sin k_n h - \sin k_n h \bar{q}}{k_n h \cos k_n h}$$

$$\begin{aligned}
B_0 &= \frac{-kz_{G1} \sinh kh + k(qh + z_{G1}) \sinh kh \bar{q} - \cosh kh + \cosh kh \bar{q}}{(kh)^2 \cosh kh} \\
B_n &= \frac{-k_n z_{G1} \sin k_n h + k_n(qh + z_{G1}) \sin k_n h \bar{q} + \cos k_n h - \cos k_n h \bar{q}}{(k_n h)^2 \cos k_n h} \\
B'_0 &= \frac{-kz_{G2} \sinh kh + k(qh + z_{G2}) \sinh kh \bar{q} - \cosh kh + \cosh kh \bar{q}}{(kh)^2 \cosh kh} \\
B'_n &= \frac{-k_n z_{G2} \sin k_n h + k_n(qh + z_{G2}) \sin k_n h \bar{q} + \sin k_n h - \cos k_n h \bar{q}}{(k_n h)^2 \cos k_n h} \\
C_1 &= \frac{1}{h^2} \left( \frac{b \{ (c + 2a - x_{G1})^3 - (c - x_{G1})^3 \}}{3 (\bar{q} h)^2} + \frac{2ab^3}{3 (\bar{q} h)^2} - 4ab \right) \\
C_2 &= \begin{cases} \frac{1}{h^2} \frac{3b \{ (c + 2a - x_{G1})^4 - (c - x_{G1})^4 \} + 2b^3 \{ (c + 2a - x_{G1})^2 - (c - x_{G1})^2 \}}{24a (\bar{q} h)^2} \\ - \frac{b}{ah^2} \{ (c + 2a - x_{G1})^2 - (c - x_{G1})^2 \} \end{cases} \\
C'_1 &= \frac{1}{h^2} \left( \frac{b \{ (c + 2a + x_{G2})^3 - (c + x_{G2})^3 \} + 2ab^3}{3 (\bar{q} h)^2} - 4ab \right) \\
C'_2 &= \begin{cases} \frac{1}{h^2} \frac{3b \{ (c + 2a + x_{G2})^4 - (c + x_{G2})^4 \} + 2b^3 \{ (c + 2a + x_{G2})^2 - (c + x_{G2})^2 \}}{24a (\bar{q} h)^2} \\ - \frac{b}{ah^2} \{ (c + 2a + x_{G2})^2 - (c + x_{G2})^2 \} \end{cases} \\
B_x &= \frac{1}{h^3} \left( \frac{5b^2 \{ (c + 2a - x_{G1})^3 - (c - x_{G1})^3 \} + 18ab^4}{90 (\bar{q} h)^2} - \frac{4ab^2}{3} \right) \\
B'_x &= \frac{1}{h^3} \left( \frac{5b^2 \{ (c + 2a + x_{G2})^3 - (c + x_{G2})^3 \} + 18ab^4}{90 (\bar{q} h)^2} - \frac{4ab^2}{3} \right)
\end{aligned}$$

$$B_y^{(1)} = \begin{cases} \frac{1}{h^3} \frac{3b \{(c+2a-x_{G1})^4 - (c-x_{G1})^4\} + 2b^3 \{(c+2a-x_{G1})^2 - (c-x_{G1})^2\}}{12 (\bar{q}h)^2} \\ - \frac{b}{h^3} \{(c+2a-x_{G1})^2 - (c-x_{G1})^2\} \end{cases}$$

$$B_y^{(2)} = \begin{cases} \frac{1}{h^3} \frac{9b \{(c+2a-x_{G1})^5 - (c-x_{G1})^5\} + 5b^3 \{(c+2a-x_{G1})^3 - (c-x_{G1})^3\}}{90a (\bar{q}h)^2} \\ - \frac{2b}{3ah^3} \{(c+2a-x_{G1})^3 - (c-x_{G1})^3\} \end{cases}$$

$$B_y'^{(1)} = \begin{cases} \frac{1}{h^3} \frac{3b \{(c+2a+x_{G2})^4 - (c+x_{G2})^4\} + 2b^3 \{(c+2a+x_{G2})^2 - (c+x_{G2})^2\}}{12 (\bar{q}h)^2} \\ - \frac{b}{h^3} \{(c+2a+x_{G2})^2 - (c+x_{G2})^2\} \end{cases}$$

$$B_y'^{(2)} = \begin{cases} \frac{1}{h^3} \frac{9b \{(c+2a+x_{G2})^5 - (c+x_{G2})^5\} + 5b^3 \{(c+2a+x_{G2})^3 - (c+x_{G2})^3\}}{90a (\bar{q}h)^2} \\ - \frac{2b}{3ah^3} \{(c+2a+x_{G2})^3 - (c+x_{G2})^3\} \end{cases}$$

## 5.2.5 부소파제의 운동방정식

부소파제  $I, II$ 의 질량을 각각  $M_i$ , 부소파제  $I, II$ 의  $x, y, z$ 축 방향으로의 관성모멘트를 각각  $I_{i1}, I_{i2}, I_{i3}$ 로 하면, 부소파제  $I, II(i = 1, 2)$ 의 각 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} M_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = P_{\Xi} - 4 (K_{11}^{(i)} \xi_i^* + K_{12}^{(i)} \eta_i^* + K_{13}^{(i)} \zeta_i^* + K_{14}^{(i)} \omega_{i1}^* + K_{15}^{(i)} \omega_{i2}^* + K_{16}^{(i)} \omega_{i3}^*) \\ M_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = P_{Y_i} - 4 (K_{21}^{(i)} \xi_i^* + K_{22}^{(i)} \eta_i^* + K_{23}^{(i)} \zeta_i^* + K_{24}^{(i)} \omega_{i1}^* + K_{25}^{(i)} \omega_{i2}^* + K_{26}^{(i)} \omega_{i3}^*) \\ M_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = P_{Z_i} + R_{Z_i} - 4 (K_{31}^{(i)} \xi_i^* + K_{32}^{(i)} \eta_i^* + K_{33}^{(i)} \zeta_i^* + K_{34}^{(i)} \omega_{i1}^* + K_{35}^{(i)} \omega_{i2}^* + K_{36}^{(i)} \omega_{i3}^*) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{i1} \frac{d^2 \delta_{i1}}{dt^2} = T_{\Xi} + W_{\Xi} - 4 (K_{41}^{(i)} \xi_i^* + K_{42}^{(i)} \eta_i^* + K_{43}^{(i)} \zeta_i^* + K_{44}^{(i)} \omega_{i1}^* + K_{45}^{(i)} \omega_{i2}^* + K_{46}^{(i)} \omega_{i3}^*) \\ I_{i2} \frac{d^2 \delta_{i2}}{dt^2} = T_{Y_i} + W_{Y_i} - 4 (K_{51}^{(i)} \xi_i^* + K_{52}^{(i)} \eta_i^* + K_{53}^{(i)} \zeta_i^* + K_{54}^{(i)} \omega_{i1}^* + K_{55}^{(i)} \omega_{i2}^* + K_{56}^{(i)} \omega_{i3}^*) \\ I_{i3} \frac{d^2 \delta_{i3}}{dt^2} = T_{Z_i} - 4 (K_{61}^{(i)} \xi_i^* + K_{62}^{(i)} \eta_i^* + K_{63}^{(i)} \zeta_i^* + K_{64}^{(i)} \omega_{i1}^* + K_{65}^{(i)} \omega_{i2}^* + K_{66}^{(i)} \omega_{i3}^*) \end{array} \right. \quad (5.48)$$

여기서,  $K_{lm}^{(i)}$ 는 부소과제  $I, II (i = 1, 2)$ 의 계류라인의 저항력으로 다음과 같이 주어진다(자세한 유도과정은 부록을 참조하기 바란다).

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{11}^{(i)} = K_{HH} \cos^2 \alpha_0 \\ K_{15}^{(i)} = (K_{HV} a + K_{HH} z_0 \cos \alpha_0) \cos \alpha_0 \\ K_{22}^{(i)} = K_{HH} \sin^2 \alpha_0 \\ K_{24}^{(i)} = (-K_{HV} b - K_{HH} z_0 \sin \alpha_0) \sin \alpha_0 \\ K_{33}^{(i)} = K_{VV} \\ K_{44}^{(i)} = K_{VV} b^2 + 2K_{HV} b z_0 \sin \alpha_0 + K_{HH} z_0^2 \sin^2 \alpha_0 \\ K_{42}^{(i)} = (-K_{HH} z_0 \sin \alpha_0 - K_{HV} b) \sin \alpha_0 \\ K_{55}^{(i)} = K_{VV} a^2 + 2K_{HV} a z_0 \sin \alpha_0 + K_{HH} z_0^2 \cos^2 \alpha_0 \\ K_{51}^{(i)} = (K_{HV} a + K_{HH} z_0 \cos \alpha_0) \cos \alpha_0 \\ K_{66}^{(i)} = K_{HH} (a \sin \alpha_0 - b \cos \alpha_0)^2 \end{array} \right.$$

여기서,  $z_0$ 는 중심에서 부체계류점까지의 연직거리로 계류점이 중심보다 위에 있는 경우에는 (+), 계류점이 중심보다 아래에 있는 경우에는 (-)를 취한다.

또한,  $R_{Z_i}$ ,  $W_{X_i}$ ,  $W_{Y_i}$ 는 다음의 식들로 주어지는 정수압적인 복원력과 모멘트를 각각 나타낸다.

$$R_{Zi} = -\rho g(4ab)z_i \quad (5.49)$$

$$W_{Xi} = -M_i g \overline{GM}_{i1} \delta_{i1} \quad (5.50)$$

$$\overline{GM}_{i1} = \frac{b^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_{Gi} \quad (5.51)$$

$$W_{Yi} = -M_i g \overline{GM}_{i2} \delta_{i2} \quad (5.52)$$

$$\overline{GM}_{i2} = \frac{a^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_{Gi} \quad (5.53)$$

따라서, 운동방정식(5.48)에 식(5.1) 및 식(5.42)~(5.47) 그리고, 식(5.49)~(5.53)을 대입하여 다음과 같은 부소파제의 운동방정식을 구성할 수 있다.

■ 부소파제  $I$  ;

$$-\frac{M_1 \sigma^2}{\rho g h^2} \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} = \begin{cases} -\frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] k \Delta \eta_j \\ -\frac{4}{\rho g h^2} \left( K_{11}^{(1)} \frac{\xi_i^*}{\zeta_0} + K_{12}^{(1)} \frac{\eta_i^*}{\zeta_0} + K_{13}^{(1)} \frac{\zeta_i^*}{\zeta_0} + \frac{K_{14}^{(1)}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \right. \\ \left. + \frac{K_{15}^{(1)}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{16}^{(1)}}{h} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \right) \end{cases} \quad (5.54)$$

$$-\frac{M_1\sigma^2}{\rho gh^2}\frac{\eta_1^*}{\zeta_0} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j))A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j)A_n \right] k \Delta \xi_j \\ & - \frac{4}{\rho gh^2} \left( K_{21}^{(1)} \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} + K_{22}^{(1)} \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} + K_{23}^{(1)} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} + \frac{K_{24}^{(1)}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{25}^{(1)}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{26}^{(1)}}{h} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.55)$$

$$-\frac{M_1\sigma^2}{\rho gh^2}\frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{i}{(kh)^2} \sum_{p=1}^M \left[ \varphi_0(p) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(p) \right] k^2 \Delta \alpha_p \\ & - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} C_1 + \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} C_2 \right] - \frac{4ab}{h^2} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} \\ & - \frac{4}{\rho gh^2} \left( K_{31}^{(1)} \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} + K_{32}^{(1)} \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} + K_{33}^{(1)} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} + \frac{K_{34}^{(1)}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{35}^{(1)}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{36}^{(1)}}{h} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.56)$$

$$-\frac{I_{11}\sigma^2}{\rho gbh^3}\frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} = \left\{ \begin{aligned} & - \frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j))B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j)B_n \right] k \Delta \xi_j \\ & + \frac{i}{(kh)^3} \sum_{p=1}^M \left[ \varphi_0(p) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(p) \right] k^3 y_p \Delta \alpha_p \\ & - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} B_x - \frac{M_1}{\rho bh^3} \left( \frac{b^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_{G1} \right) \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \\ & - \frac{4}{\rho gh^3} \left( K_{41}^{(1)} \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} + K_{42}^{(1)} \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} + K_{43}^{(1)} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} + \frac{K_{44}^{(1)}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{45}^{(1)}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{46}^{(1)}}{h} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.57)$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{I_{12}\sigma^2}{\rho g a h^3} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} \\
& = \left\{ \begin{aligned}
& - \frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n \right] k \Delta \eta_j \\
& + \frac{i}{(kh)^3} \sum_{p=1}^M \left[ \varphi_0(p) + \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(p) \right] k^3 (x_p - x_{G1}) \Delta \alpha_p \\
& - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} B_y^{(1)} + \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} B_y^{(2)} \right] \\
& - \frac{M_1}{\rho b h^3} \left( \frac{b^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_{G1} \right) \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} - \frac{4}{\rho g h^3} \left( K_{51}^{(1)} \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} \right. \\
& \left. + K_{52}^{(1)} \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} + K_{53}^{(1)} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} + \frac{K_{54}^{(1)}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} + \frac{K_{55}^{(1)}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{56}^{(1)}}{h} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \right)
\end{aligned} \right. \quad (5.58)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{I_{13}\sigma^2}{\rho g h^4} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \\
& = \left\{ \begin{aligned}
& \frac{i}{(kh)^2} \sum_{j=1}^{N_1} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] \{ k^2 (\xi_j - x_{G1}) \Delta \xi_j \\
& + k^2 \eta_j \Delta \eta_j \} - \frac{4}{\rho g h^3} \left( K_{61}^{(1)} \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} + K_{62}^{(1)} \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} + K_{63}^{(1)} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} \right. \\
& \left. + \frac{K_{64}^{(1)}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} + \frac{K_{65}^{(1)}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{66}^{(1)}}{h} \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \right)
\end{aligned} \right. \quad (5.59)
\end{aligned}$$



■ 부소파제 II ;

$$-\frac{M_2\sigma^2}{\rho gh^2} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} = \left\{ \begin{aligned} & -\frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j))A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j)A_n \right] k \Delta \eta_j \\ & -\frac{4}{\rho gh^2} \left( K_{11}^{(2)} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} + K_{12}^{(2)} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} + K_{13}^{(2)} + \frac{K_{14}^{(2)}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{15}^{(2)}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{16}^{(2)}}{h} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.60)$$

$$-\frac{M_2\sigma^2}{\rho gh^2} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j))A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j)A_n \right] k \Delta \xi_j \\ & -\frac{4}{\rho gh^2} \left( K_{21}^{(2)} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} + K_{22}^{(2)} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} + K_{23}^{(2)} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} + \frac{K_{24}^{(2)}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{25}^{(2)}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{26}^{(2)}}{h} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.61)$$

$$-\frac{M_2\sigma^2}{\rho gh^2} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{i}{(kh)^2} \sum_{q=1}^M \left[ \psi_0(q) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(q) \right] k^2 \Delta \alpha_q \\ & -\frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} C_1' + \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} C_2' \right] - \frac{4ab}{h^2} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} \\ & -\frac{4}{\rho gh^2} \left( K_{31}^{(2)} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} + K_{32}^{(2)} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} + K_{33}^{(2)} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} + \frac{K_{34}^{(2)}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{35}^{(2)}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{36}^{(2)}}{h} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.62)$$

$$\begin{aligned}
-\frac{I_{21}\sigma^2}{\rho g b h^3} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} = & \left\{ \begin{aligned} & -\frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n \right] k \Delta \xi_j \\ & + \frac{i}{(kh)^3} \sum_{q=1}^M \left[ \psi_0(p) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(p) \right] k^3 y_q \Delta \alpha_q \\ & - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} B'_x - \frac{M_2}{\rho b h^3} \left( \frac{b^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_{G2} \right) \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \\ & - \frac{4}{\rho g h^3} \left( K_{41}^{(2)} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} + K_{42}^{(2)} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} + K_{43}^{(2)} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} + \frac{K_{44}^{(2)}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + \frac{K_{45}^{(2)}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{46}^{(2)}}{h} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.63)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{I_{22}\sigma^2}{\rho g a h^3} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} = & \left\{ \begin{aligned} & -\frac{i}{kh} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) B_n \right] k \Delta \eta_j \\ & + \frac{i}{(kh)^3} \sum_{q=1}^M \left[ \psi_0(q) + \sum_{v=1}^{\infty} \psi_v(q) \right] k^3 (x_q - x_{G2}) \Delta \alpha_q \\ & - \frac{\bar{q}}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left[ \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} B_y^{(1)} + \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} B_y^{(2)} \right] \\ & - \frac{M_2}{\rho b h^3} \left( \frac{b^2}{3qh} - \frac{qh}{2} - z_{G2} \right) \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} - \frac{4}{\rho g h^3} \left( K_{51}^{(2)} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} \right. \\ & \left. + K_{52}^{(2)} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} + K_{53}^{(2)} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} + \frac{K_{54}^{(2)}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} + \frac{K_{55}^{(2)}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{56}^{(2)}}{h} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \right) \end{aligned} \right. \quad (5.64)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{I_{23}\sigma^2}{\rho gh^4} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \\
& = \left\{ \frac{i}{(kh)^2} \sum_{j=1}^{N_2} \left[ (f_0(j) + f_1(j)) A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(j) A_n \right] \{k^2 (\xi_j - x_{G2}) \Delta \xi_j \right. \\
& \quad + k^2 \eta_j \Delta \eta_j \} - \frac{4}{\rho gh^3} \left( K_{61}^{(2)} \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} + K_{62}^{(2)} \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} + K_{63}^{(2)} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{K_{64}^{(2)}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} + \frac{K_{65}^{(2)}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} + \frac{K_{66}^{(2)}}{h} \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{5.65}$$

## 5.2.6 영역경계면에서의 연속조건

부체측면에서는 식(5.3)에 나타낸 운동학적인 경계조건이 성립하고, 또한 외역  $I$ 과 내역  $II$ ,  $III$ 의 유체운동에 대해서는 경계  $D$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ 에 있어서 동역학적인 연속성, 즉 질량Flux와 에너지Flux의 연속이 성립되어야 한다. 따라서, 다음의 조건식이 성립한다.

■ 부소파제  $I$  ;

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial n} = \begin{cases} -i\sigma [(\xi_1^* l + \eta_1^* m) - \omega_{11}^* (z - z_{G1}) m \\ + \omega_{12}^* (z - z_{G1}) l + \omega_{13}^* \{(x - x_{G1}) m - yl\}], \quad -qh \leq z \leq 0 \end{cases} \tag{5.66}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_I}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{II}}{\partial n}, \quad -h \leq z \leq -qh \\ \phi_I = \phi_{II}, \quad -h \leq z \leq -qh \end{cases} \tag{5.67}$$

■ 부소파제  $II$  ;

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial n} = \begin{cases} -i\sigma [(\xi_2^* l + \eta_2^* m) - \omega_{21}^* (z - z_{G2}) m \\ + \omega_{22}^* (z - z_{G2}) l + \omega_{23}^* \{(x - x_{G2}) m - yl\}], \quad -qh \leq z \leq 0 \end{cases} \tag{5.68}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_I}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{III}}{\partial n}, & -h \leq z \leq -qh \\ \phi_I = \phi_{III}, & -h \leq z \leq -qh \end{cases} \quad (5.69)$$

여기서,  $l = dx/dn$ ,  $m = dy/dn$ 은  $x, y$ 축에 대한 외향법선방향의 방향여현을 나타낸다.

위의 관계식에 식(5.8), (5.11), (5.12)의 속도포텐셜  $\phi_I, \phi_{II}, \phi_{III}$ 를 대입하고, 함수계  $\cosh k(z + qh)$ ,  $\cos k_n(z + h)$ 가  $-h \leq z \leq 0$ 에서 직교함수를 이루고,  $\cos \bar{s}(z + h)$ ,  $\cos \bar{v}(z + h)$ 가 각각  $-h \leq z \leq -qh$ 에서 자기직교함수를 이루는 고유함수의 특성을 이용하여 다음의 구성방정식을 얻는다.

■ 부소파제  $I$  ;

$$\begin{aligned} & (\bar{f}_0 + \bar{f}_1)N_0 - \bar{\varphi}_0 N_1 - \sum_{s=1}^{\infty} \bar{\varphi}_s N_s \\ & + i \left( \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} l + \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} m \right) g_0 - i \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} \frac{l(\xi_{1i} - x_{G1}) + m\eta_{1i}}{h} g_2 \\ & - i \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \left( m \frac{h}{b} g_1 - m g_3 + \frac{(\xi_{1i} - x_{G1})^2 m + 2(\xi_{1i} - x_{G1})\eta_{1i} l + 3\eta_{1i}^2 m}{4bh} g_2 \right) \\ & + i \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} \left( l \frac{h}{a} g_1 - l g_3 + \frac{3(\xi_{1i} - x_{G1})^2 l + 2(\xi_{1i} - x_{G1})\eta_{1i} m + \eta_{1i}^2 l}{4ah} g_2 \right) \\ & + i \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \left( \frac{\xi_{1i} - x_{G1}}{h} m - \frac{\eta_{1i}}{h} l \right) g_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.70)$$

$$\begin{aligned} & \bar{f}_2^{(n)} \frac{kh}{k_n h} N_n - \bar{\varphi}_0 \frac{kh}{k_n h} N_{1n} - \sum_{s=1}^{\infty} \bar{\varphi}_s N_{sn} \\ & + i \left( \frac{\xi_1^*}{\zeta_0} l + \frac{\eta_1^*}{\zeta_0} m \right) g_{0n} - i \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} \frac{l(\xi_{1i} - x_{G1}) + m\eta_{1i}}{h} g_{2n} \\ & - i \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \left( m \frac{h}{b} g_{1n} - m g_{3n} + \frac{(\xi_{1i} - x_{G1})^2 m + 2(\xi_{1i} - x_{G1})\eta_{1i} l + 3\eta_{1i}^2 m}{4bh} g_{2n} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + i \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} \left( l \frac{h}{a} g_{1n} - l g_{3n} + \frac{3(\xi_{1i} - x_{G1})^2 l + 2(\xi_{1i} - x_{G1}) \eta_{1i} m + \eta_{1i}^2 l}{4ah} g_{2n} \right) \\
& + i \frac{\omega_{13}^* h}{\zeta_0} \left( \frac{\xi_{1i} - x_{G1}}{h} m - \frac{\eta_{1i}}{h} l \right) g_{0n} = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{5.71}$$

$$\begin{aligned}
& (f_0 + f_1) d_1 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)} d_n - \varphi_0 \bar{q} + i \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} \frac{\sigma^2 h}{g} \left( \frac{\bar{q}^2}{6} - \frac{(\xi_{1i} - x_{G1})^2 + \eta_{1i}^2}{4h^2} \right) \\
& + i \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \frac{\sigma^2 h}{g} \left( \frac{\bar{q}^2}{6} \frac{\eta_{1i}}{b} - \frac{(\xi_{1i} - x_{G1})^2 \eta_{1i} + \eta_{1i}^3}{8bh^2} \right) \\
& - i \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} \frac{\sigma^2 h}{g} \left( \frac{\bar{q}^2}{6} \frac{\xi_{1i} - x_{G1}}{a} - \frac{(\xi_{1i} - x_{G1})^3 + (\xi_{1i} - x_{G1}) \eta_{1i}^2}{8ah^2} \right) = 0
\end{aligned} \tag{5.72}$$

$$\begin{aligned}
& (f_0 + f_1) d_{1s} + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)} d_{ns} - \varphi_s \frac{\bar{q}}{2} + i \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{1}{(\bar{s}h)^2} \frac{\zeta_1^*}{\zeta_0} + i \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{1}{(\bar{s}h)^2} \frac{\eta_{1i}}{b} \frac{\omega_{11}^* b}{\zeta_0} \\
& - i \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{1}{(\bar{s}h)^2} \frac{\xi_{1i} - x_{G1}}{a} \frac{\omega_{12}^* a}{\zeta_0} = 0, \quad s = 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{5.73}$$

■ 부소파제 II ;

$$\begin{aligned}
& (\bar{f}_0 + \bar{f}_1) N_0 - \bar{\psi}_0 N_1 - \sum_{v=1}^{\infty} \bar{\psi}_v N_v \\
& + i \left( \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} l + \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} m \right) g_0 - i \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} \frac{l(\xi_{2i} - x_{G2}) + m \eta_{2i}}{h} g_2 \\
& - i \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \left( m \frac{h}{b} g_1 - m g_3 + \frac{(\xi_{1i} - x_{G2})^2 m + 2(\xi_{1i} - x_{G2}) \eta_{2i} l + 3\eta_{2i}^2 m}{4bh} g_2 \right) \\
& + i \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} \left( l \frac{h}{a} g_1 - l g_3 + \frac{3(\xi_{2i} - x_{G2})^2 l + 2(\xi_{2i} - x_{G2}) \eta_{2i} m + \eta_{2i}^2 l}{4ah} g_2 \right) \\
& + i \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \left( \frac{\xi_{2i} - x_{G2}}{h} m - \frac{\eta_{2i}}{h} l \right) g_0 = 0
\end{aligned} \tag{5.74}$$

$$\begin{aligned}
& \bar{f}_2^{(n)} \frac{kh}{k_n h} N_n - \bar{\psi}_0 \frac{kh}{k_n h} N_{1n} - \sum_{v=1}^{\infty} \bar{\psi}_v N_{vn} \\
& + i \left( \frac{\xi_2^*}{\zeta_0} l + \frac{\eta_2^*}{\zeta_0} m \right) g_{0n} - i \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} \frac{l(\xi_{2i} - x_{G2}) + m\eta_{2i}}{h} g_{2n} \\
& - i \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \left( m \frac{h}{b} g_{1n} - m g_{3n} + \frac{(\xi_{2i} - x_{G2})^2 m + 2(\xi_{2i} - x_{G2})\eta_{2i} l + 3\eta_{2i}^2 m}{4bh} g_{2n} \right) \\
& + i \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} \left( l \frac{h}{a} g_{1n} - l g_{3n} + \frac{3(\xi_{2i} - x_{G2})^2 l + 2(\xi_{2i} - x_{G2})\eta_{2i} m + \eta_{2i}^2 l}{4ah} g_{2n} \right) \\
& + i \frac{\omega_{23}^* h}{\zeta_0} \left( \frac{\xi_{2i} - x_{G2}}{h} m - \frac{\eta_{2i}}{h} l \right) g_{0n} = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{5.75}$$

$$\begin{aligned}
& (f_0 + f_1) d_1 + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)} d_n - \psi_0 \bar{q} + i \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} \frac{\sigma^2 h}{g} \left( \frac{\bar{q}^2}{6} - \frac{(\xi_{2i} - x_{G2})^2 + \eta_{2i}^2}{4h^2} \right) \\
& + i \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \frac{\sigma^2 h}{g} \left( \frac{\bar{q}^2}{6} \frac{\eta_{2i}}{b} - \frac{(\xi_{2i} - x_{G2})^2 \eta_{2i} + \eta_{2i}^3}{8bh^2} \right) \\
& - i \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} \frac{\sigma^2 h}{g} \left( \frac{\bar{q}^2}{6} \frac{\xi_{2i} - x_{G2}}{a} - \frac{(\xi_{2i} - x_{G2})^3 + (\xi_{2i} - x_{G2})\eta_{2i}^2}{8ah^2} \right) = 0
\end{aligned} \tag{5.76}$$

$$\begin{aligned}
& (f_0 + f_1) d_{1v} + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)} d_{nv} - \psi_v \frac{\bar{q}}{2} + i \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{1}{(\bar{v}h)^2} \frac{\zeta_2^*}{\zeta_0} + i \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{1}{(\bar{v}h)^2} \frac{\eta_{2i}}{b} \frac{\omega_{21}^* b}{\zeta_0} \\
& - i \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{1}{(\bar{v}h)^2} \frac{\xi_{2i} - x_{G2}}{a} \frac{\omega_{22}^* a}{\zeta_0} = 0, \quad v = 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{5.77}$$

여기서,

$$N_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

$$N_n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k_n h}{\sin 2k_n h} \right)$$

$$N_1 = \frac{\sinh kh \bar{q}}{\sinh kh}$$

$$N_{1n} = \frac{\sin k_n h \bar{q}}{\sin k_n h}$$

$$N_s = \frac{(kh)^2 \sinh kh \bar{q}}{((kh)^2 + (\bar{s}h)^2) \sinh kh}$$

$$N_{sn} = \frac{kh k_n h \sin k_n h \bar{q}}{((k_n h)^2 - (\bar{s}h)^2) \sin k_n h}$$

$$g_0 = \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\sinh kh - \sinh kh \bar{q}}{kh \sinh kh}$$

$$g_{0n} = \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\sin k_n h - \sin k_n h \bar{q}}{k_n h \sin k_n h}$$

$$g_1 = \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{qkh \sinh kh \bar{q} + \cosh kh \bar{q} - \cosh kh + kz_{G1} (\sinh kh \bar{q} - \sinh kh)}{(kh)^2 \sinh kh}$$

$$g_{1n} = \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{qk_n h \sin k_n h \bar{q} - \cos k_n h \bar{q} + \cos k_n h + k_n z_{G1} (\sin k_n h \bar{q} - \sin k_n h)}{(k_n h)^2 \sin k_n h}$$

$$g_2 = \frac{1}{2\bar{q}} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\sinh kh \bar{q}}{kh \sinh kh}$$

$$g_{2n} = \frac{1}{2\bar{q}} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{\sin k_n h \bar{q}}{k_n h \sin k_n h}$$

$$g_3 = \frac{1}{2\bar{q}} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{((kh \bar{q})^2 + 2) \sinh kh \bar{q} - 2kh \bar{q} \sinh kh}{ka (kh)^2 \sinh kh}$$

$$g_{3n} = \frac{1}{2\bar{q}} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{((k_n h \bar{q})^2 - 2) \sin k_n h \bar{q} + 2k_n h \bar{q} \cos k_n h}{k_n a (k_n h)^2 \sin k_n h}$$

$$d_1 = \frac{\sinh kh \bar{q}}{kh \cosh kh}$$

$$d_n = \frac{\sin k_n h \bar{q}}{k_n h \cos k_n h}$$

$$d_{1s} = \frac{kh \sinh kh \bar{q}}{\{(kh)^2 + (\bar{s}h)^2\} \cosh kh}$$

$$d_{ns} = \frac{k_n h \sin k_n h \bar{q}}{\{(k_n h)^2 - (\bar{s} h)^2\} \cos k_n h}$$

### 5.2.7 제량의 결정

$f_0(j), \bar{f}_0(j)$ 는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\left\{ \begin{array}{l} f_0(j) = -i \exp \{ -i (k \xi_j \cos \theta + k \eta_j \sin \theta) \} \\ \bar{f}_0(j) = \frac{\partial f_0(j)}{k \partial n} = \frac{\Delta \xi_j \sin \theta - \Delta \eta_j \cos \theta}{\Delta s_j} \exp \{ -i (k \xi_j \cos \theta + k \eta_j \sin \theta) \} \\ \Delta \xi_j = \frac{\xi_{j+1} - \xi_{j-1}}{2} \\ \Delta \eta_j = \frac{\eta_{j+1} - \eta_{j-1}}{2} \\ \Delta s_j = \sqrt{\Delta \xi_j^2 + \Delta \eta_j^2} \end{array} \right. \quad (5.78)$$

이상으로부터 미지수의 수는 경계면  $D$ 를  $n$ 개,  $D_1$ 과  $D_2$ 를 각각  $L$ 개의 절점으로 나누면  $f_1$ 에서  $N$ 개,  $\bar{f}_1$ 에서  $N$ 개,  $f_2^{(n)}$ 에서  $N \times n$ 개,  $\bar{f}_2^{(n)}$ 에서  $N \times n$ 개,  $\varphi_0$ 에서  $L$ 개,  $\bar{\varphi}_0$ 에서  $L$ 개,  $\varphi_s$ 에서  $L \times s$ 개,  $\bar{\varphi}_s$ 에서  $L \times s$ 개,  $\psi_0$ 에서  $L$ 개,  $\bar{\psi}_0$ 에서  $L$ 개,  $\psi_v$ 에서  $L \times v$ 개,  $\bar{\psi}_v$ 에서  $L \times v$ 개,  $\xi_i^*, \eta_i^*, \zeta_i^*, \omega_{i1}^*, \omega_{i2}^*, \omega_{i3}^*$ 에서  $6 \times i (= 2)$ 개로 되어 총  $4N + 4L + 2 \{Nn + L(s + v)\} + 12$ 로 되고, 방정식의 수는 식(5.29)에서  $N(1 + n)$ 개, 식(5.30)에서  $L(1 + s)$ 개, 식(5.31)에서  $L(1 + v)$ 개, 식(5.54)~(5.65)에서 12개, 식(5.70), (5.74)에서  $N$ 개, 식(5.71), (5.75)에서  $N \times n$ 개, 식(5.72)에서  $L$ 개, 식(5.73)에서  $L \times s$ 개, 식(5.76)에서  $L$ 개, 식(5.77)에서  $L \times v$ 개, 식(5.78)에서  $2N$ 개로 총  $4N + 4L + 2 \{Nn + L(s + v)\} + 12$ 로 되므로, 이로부터 구성되는 대수연립방정식을 해석함으로서 전 미지수를 산정할 수 있다. 여기서,  $f_0, \bar{f}_0$ 는 식(5.78)과 같이 기지 로 주어진다.



수치계산에서 식(5.22)~(5.27) 등의 산정은 다음과 같이 수행된다.

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{ij} = -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(kR_{ij}) k \Delta s_j \\ A_{ii} = \frac{1}{\pi} \left( \gamma - 1 + \log \frac{k \Delta s_i}{4} - i \frac{\pi}{2} \right) k \Delta s_i \\ \bar{A}_{ij} = \frac{i}{2} H_1^{(1)}(kR_{ij}) \left( \frac{\xi_j - \xi_i}{R_{ij}} k \Delta \eta_j - \frac{\eta_j - \eta_i}{R_{ij}} k \Delta \xi_j \right) \\ \bar{A}_{ii} = 0 \end{array} \right. \quad (5.79)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{ij} = -\frac{1}{\pi} K_0(k_n R_{ij}) k \Delta s_j \\ B_{ii} = \frac{1}{\pi} \left( \gamma - 1 + \log \frac{k_n \Delta s_i}{4} \right) k \Delta s_i \\ \bar{B}_{ij} = \frac{1}{\pi} K_1(k_n R_{ij}) \left( \frac{\xi_j - \xi_i}{R_{ij}} k_n \Delta \eta_j - \frac{\eta_j - \eta_i}{R_{ij}} k_n \Delta \xi_j \right) \\ \bar{B}_{ii} = 0 \end{array} \right. \quad (5.80)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{ij} = \frac{1}{\pi} \log(kR_{ij}^{(1)}) k \Delta s_j^{(1)} \\ C_{ii} = \frac{1}{\pi} \left( \log \frac{k \Delta s_i^{(1)}}{2} - 1 \right) k \Delta s_i^{(1)} \\ \bar{C}_{ij} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{kR_{ij}^{(1)}} \left( \frac{\xi_j^{(1)} - \xi_i^{(1)}}{R_{ij}^{(1)}} k \Delta \eta_j^{(1)} - \frac{\eta_j^{(1)} - \eta_i^{(1)}}{R_{ij}^{(1)}} k \Delta \xi_j^{(1)} \right) \\ \bar{C}_{ii} = 0 \end{array} \right. \quad (5.81)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{ij} = -\frac{1}{\pi} K_0(\bar{s} R_{ij}^{(1)}) k \Delta s_j^{(1)} \\ D_{ii} = \frac{1}{\pi} \left( \gamma - 1 + \log \frac{\bar{s} \Delta s_i^{(1)}}{4} \right) k \Delta s_i^{(1)} \\ \bar{D}_{ij} = \frac{1}{\pi} K_1(\bar{s} R_{ij}^{(1)}) \left( \frac{\xi_j^{(1)} - \xi_i^{(1)}}{R_{ij}^{(1)}} \bar{s} \Delta \eta_j^{(1)} - \frac{\eta_j^{(1)} - \eta_i^{(1)}}{R_{ij}^{(1)}} \bar{s} \Delta \xi_j^{(1)} \right) \\ \bar{D}_{ii} = 0 \end{array} \right. \quad (5.82)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{ij} = \frac{1}{\pi} \log(k R_{ij}^{(2)}) k \Delta s_j^{(2)} \\ E_{ii} = \frac{1}{\pi} \left( \log \frac{k \Delta s_i^{(2)}}{2} - 1 \right) k \Delta s_i^{(2)} \\ \bar{E}_{ij} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{k R_{ij}^{(2)}} \left( \frac{\xi_j^{(2)} - \xi_i^{(2)}}{R_{ij}^{(2)}} k \Delta \eta_j^{(2)} - \frac{\eta_j^{(2)} - \eta_i^{(2)}}{R_{ij}^{(2)}} k \Delta \xi_j^{(2)} \right) \\ \bar{E}_{ii} = 0 \end{array} \right. \quad (5.83)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{ij} = -\frac{1}{\pi} K_0(\bar{v} R_{ij}^{(2)}) k \Delta s_j^{(2)} \\ F_{ii} = \frac{1}{\pi} \left( \gamma - 1 + \log \frac{\bar{v} \Delta s_i^{(2)}}{4} \right) k \Delta s_i^{(2)} \\ \bar{F}_{ij} = \frac{1}{\pi} K_1(\bar{v} R_{ij}^{(2)}) \left( \frac{\xi_j^{(2)} - \xi_i^{(2)}}{R_{ij}^{(2)}} \bar{v} \Delta \eta_j^{(2)} - \frac{\eta_j^{(2)} - \eta_i^{(2)}}{R_{ij}^{(2)}} \bar{v} \Delta \xi_j^{(2)} \right) \\ \bar{F}_{ii} = 0 \end{array} \right. \quad (5.84)$$

$$\begin{cases} \Delta\xi_j^{(1)} = \frac{\xi_{j+1}^{(1)} - \xi_{j-1}^{(1)}}{2} \\ \Delta\eta_j^{(1)} = \frac{\eta_{j+1}^{(1)} - \eta_{j-1}^{(1)}}{2} \\ \Delta s_j^{(1)} = \sqrt{(\Delta\xi_j^{(1)})^2 + (\Delta\eta_j^{(1)})^2} \end{cases} \quad (5.85)$$

$$\begin{cases} \Delta\xi_j^{(2)} = \frac{\xi_{j+1}^{(2)} - \xi_{j-1}^{(2)}}{2} \\ \Delta\eta_j^{(2)} = \frac{\eta_{j+1}^{(2)} - \eta_{j-1}^{(2)}}{2} \\ \Delta s_j^{(2)} = \sqrt{(\Delta\xi_j^{(2)})^2 + (\Delta\eta_j^{(2)})^2} \end{cases} \quad (5.86)$$

여기서,  $\gamma$ 는 Euler상수를 나타낸다. 또한, 외역의 임의점  $(x, y)$ 에 있어서 파의 진폭과 입사파의 진폭의 비  $K_d$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$K_d = |f_0(x, y) + f_1(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} f_2^{(n)}(x, y)| \quad (5.87)$$

## 5.3 해석결과

### 5.3.1 해석결과의 검증

이 연구의 타당성을 검증하기 위하여 1基의 자유부체와 긴장계류된 부소파제에 대한 井島 등(1975)의 수치해석 결과와 이 해석결과와 비교하였다. Fig. 5.3(a)~(c)와 Fig. 5.4(a)~(c)는 무차원홀수가 각각  $q=0.25, 0.50$ 인 경우에 있어서의 직각입사파랑에 대한 무차원주기의 변화에 따른 부소파제의 무차원운동량(Heaving, Swaying, Rolling)에 대한 수치해석결과를 나타낸다.

먼저, 자유부체에 대한 수치해석 결과를 살펴보면, Swaying과 Rolling의 공진점이 대응하는 것을 확인할 수 있으며, 무차원홀수  $q=0.5$ 의 경우가 공진점이 장주기측으로 이동된 것을 확인할 수 있다. 이는 홀수가 깊을수록 유체저항이 증가하기 때문으로 판

단된다. 계류부체에 대한 수치해석 결과에서도 Swaying과 Rolling의 공진점이 대응하며, 자유부체에 비해 공진점이 장주기측으로 이동한 것을 알 수 있다.

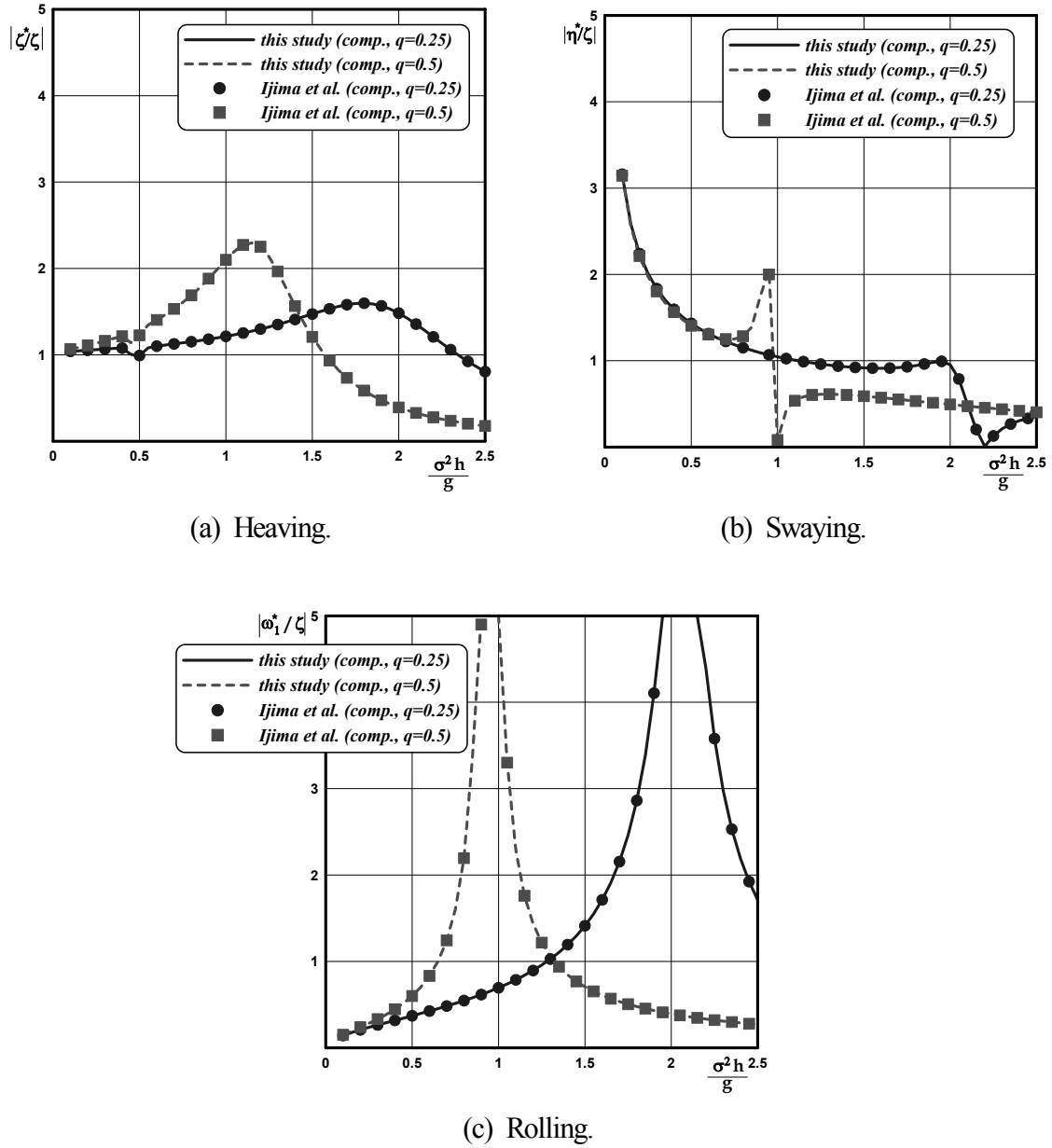
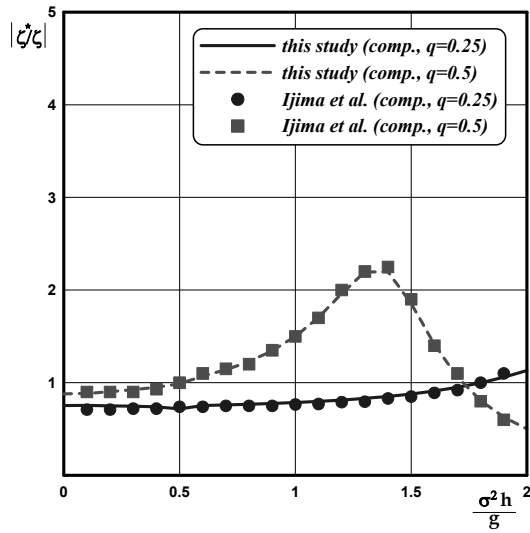
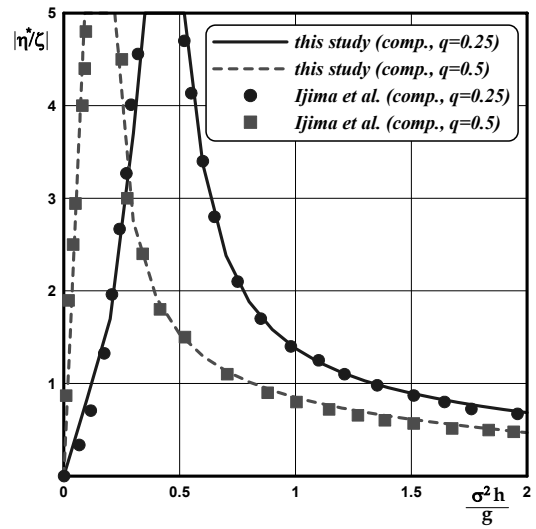


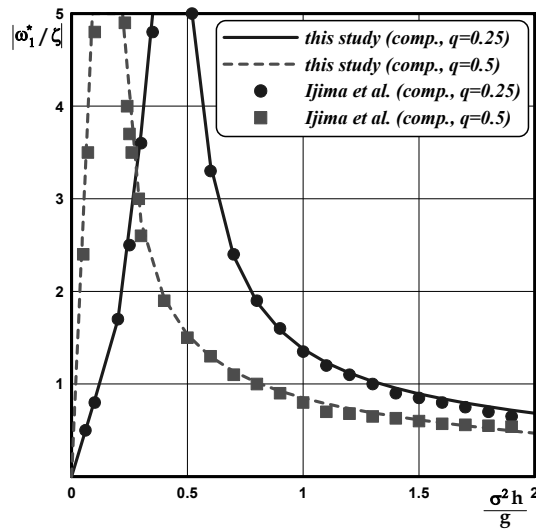
Fig. 5.3. 자유부체의 무차원운동량.



(a) Heaving.



(b) Swaying.



(c) Rolling.

Fig. 5.4. 긴장계류된 부소파제의 무차원운동량.

그림에서 나타난 바와 같이 전체적으로 결과들이 매우 잘 일치하는 것으로 판단되므로 이 연구의 타당성을 검증할 수 있다.

### 5.3.2 수치해석 조건

수치해석에 사용된 수심과 부소파제의 제원 및 계류라인의 조건 등은 Fig. 5.5에 나타난 바와 같고, 돌핀계류 부소파제와 Catenary계류 부소파제에 대하여 부소파제의 길이와 개구폭은 고정하고, 흘수와 입사파향각, 입사파의 주기 및 부체폭에 변화를

주어 수치해석을 실시하였다. 다음의 Table 5.1에 수치해석 CASE를 나타낸다.

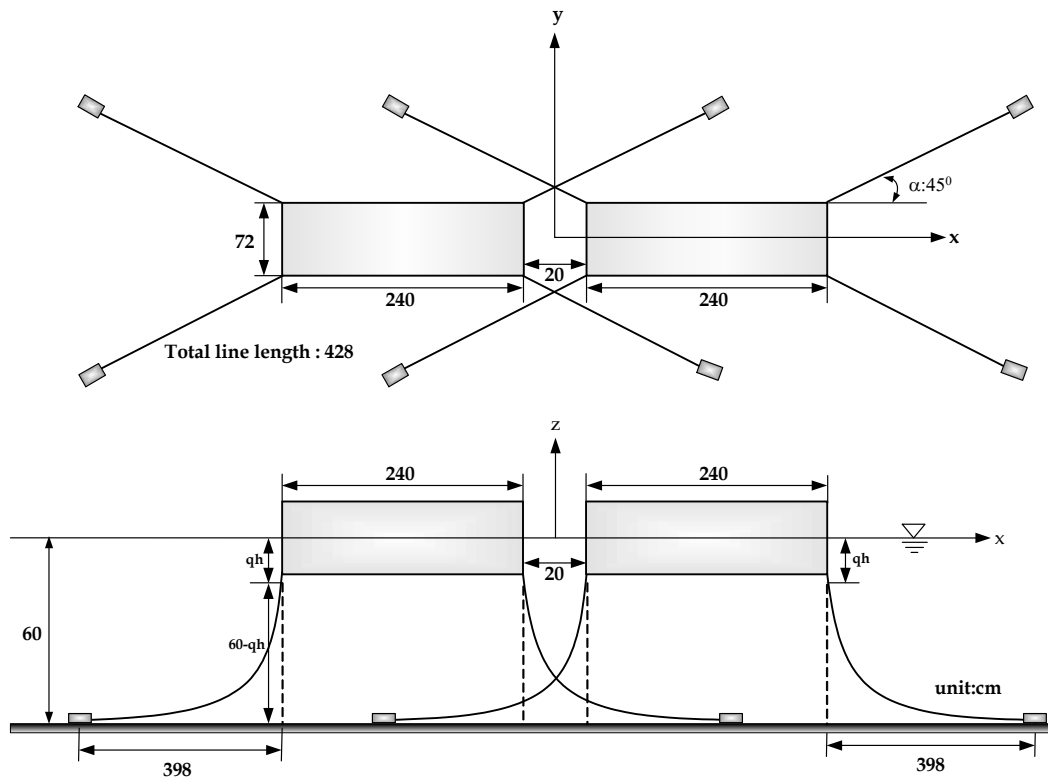


Fig. 5.5. 계류라인의 조건.

Table 5.1. 수치해석의 CASE.

돌핀계류 부소파제				Catenary계류 부소파제			
구 분	크 기			구 분	크 기		
수심(cm)	60			수심(cm)	60		
길이(cm)	240			길이(cm)	240		
개구폭(cm)	40			개구폭(cm)	40		
무차원홀수	0.25	0.35	0.45	무차원홀수	0.25	0.35	0.45
입사파향각( ° )	45	60	90	입사파향각( ° )	45	60	90
입사파주기(sec)	0.8	1.0	1.2	입사파주기(sec)	1.0	1.2	1.4
부체폭(cm)	48	72	96	부체폭(cm)	48	72	96

부소파제의 질량과 관성모멘트는 부소파제 I과 부소파제 II가 각각 동일하며, 다음의 식으로 정의된다.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 = M_2 = 4\rho abqh \\ I_{11} = I_{21} = \frac{4}{3}\rho\nu_1^2 ab^3qh \left\{ 1 + \left( \frac{qh}{2b} \right) \right\} \\ I_{12} = I_{22} = \frac{4}{3}\rho\nu_2^2 a^3bqh \left\{ 1 + \left( \frac{qh}{2a} \right) \right\} \\ I_{13} = I_{23} = \frac{4}{3}\rho\nu_3^2 ab(a^2 + b^2)qh \end{array} \right. \quad (5.88)$$

위의 식에서  $\nu_1^2 = \nu_2^2 = \nu_3^2 = 1.25$ ,  $z_G = -qh/2$ 로 고정하여 수치계산을 수행하였다.

### 5.3.3 돌핀계류 부소파제의 해석결과

#### (1) 파랑변형

##### (a) 흘수의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.6(a)~(c)는 무차원흘수가 각각  $q=0.25, 0.35, 0.45$ 인 경우에 있어서 회절계수(무차원파고분포)의 공간분포를 나타낸 결과이다. 모든 그림에서 부소파제에 의한 입사파의 반사로 인한 부분중복파의 형성을 볼 수 있으며, 이는 부소파제의 바로 전면에서 가장 명확히 나타나고 부소파제에서 멀어질수록 파랑에너지의 수평분산에 의해 확산된다.

여기서, 흘수가 깊을수록 개구부에서 파랑이 더욱 집중되는 현상을 볼 수 있으며, 이로부터 개구부를 통해 배후해역으로 보다 큰 파랑에너지가 전파된다. 이와 같은 현상은 흘수가 깊을수록 부소파제 저면을 통한 에너지 전달이 작아지고, 상대적으로 개구부를 통한 에너지 전달이 많아지기 때문으로 판단된다. 그리고, 부소파제 배후역에서 정온도를 살펴보면, 정온도의 차이는 크게 발생하지 않지만, Fig. 5.6(a)의 경우가 이 계산의 범위내에서는 가장 탁월한 것으로 나타났다. 이로부터 일반적으로 흘수가 깊은 경우에 부소파제의 저면을 통한 파랑에너지가 많이 차단되므로 정온도가 향상될 것으로 여겨지지만, 반대로 개구부를 통한 에너지전달이 상대적으로 커져 오히려 정온도가 나빠지는 경우가 있다는 것을 알 수 있다.

부소파제의 설계에 있어서 흘수는 부소파제의 상부에서 주어지는 하중의 조건 및 부소파제의 재료의 특성에 의해 일반적으로 고정되는 값으로, 부소파제의 계획에서 Ballast로 흘수를 변화시킬 수 있는 범위는 매우 적다. 따라서, 입사파랑조건에 따라 최적의 단면형상을 얻기 위해서는 후술하는 부소파제의 폭과 흘수를 동시에 고려하여 판

단할 필요가 있을 것이다.

(b) 입사파향각의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.7(a), (b)는 입사파향각을 각각  $\theta = 60^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 변화시킨 경우에 있어서 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서,  $\theta = 90^\circ$ 인 Fig. 5.6(b)의 경우를 포함하여 검토하면, 직각으로 입사하는 경우에는 입사파향에 대해서 동일한 각도로 반사파가 형성되므로 무차원파고분포가  $y$  축에 대해서 좌우대칭으로 형성되지만,  $\theta = 60^\circ$ ,  $45^\circ$ 의 경우에는 입사파랑이 우측상방에서 경사지게 입사하고 부소파제에서 반사파는 동일한 각도로 좌측상방으로 반사되므로 부소파제의 전면에서 나타나는 부분중복파가 좌측에 형성될 것이며, 이러한 현상은 입사파향각이 작을수록 보다 좌측으로 이동할 것이다. 따라서, Fig. 5.7(a)의 경우보다 Fig. 5.7(b)의 경우가 부분중복파의 형성이 좌측으로 치우쳐 있다는 것을 알 수 있다. 배후역의 파고분포를 살펴보면, 입사파향각이 작을수록 우측으로 유입되는 입사파랑에너지가 많기 때문에 상대적인 정온역이 보다 좌측으로 치우쳐 있으며, 그의 범위는 좁아진다는 것을 알 수 있다.

이로부터 부소파제의 배치는 일반적으로 입사파향에 대해서 직각으로 배치하는 것이 파랑제어에 효과적이라는 것을 알 수 있다. 그러나, 해역에 따라서 정온해역 위치의 차이 및 해안시설물의 보호 및 선박의 접안능력 등을 고려하여 최적의 배치안을 도출할 필요가 있을 것이며, 이와 같은 부소파제의 배치계획은 부소파제의 설계에 있어서 가장 중요한 문제 중의 하나이다.

(c) 입사주기의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.8(a), (b)는 입사주기가 각각  $\sigma^2 h/g = 3.776$ ,  $1.678$ 인 경우에 대한 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 전체적으로는 전술한 Fig. 5.6과 동일한 공간적인 분포형태를 가지지만 주기가 길어질수록 반사파가 작아지고, 그로부터 부소파제의 전면에서 형성되는 부분중복파의 형성이 작아져 부소파제의 배후해역에서 파고치가 커지는, 즉 정온도가 나빠지는 결과를 초래한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 잘 알려져 있는 부소파제의 일반적인 결과로서 주기가 긴 파랑일수록 부소파제의 파랑제어효과가 떨어진다는 것을 3차원해석에 의해서도 확인할 수 있다.

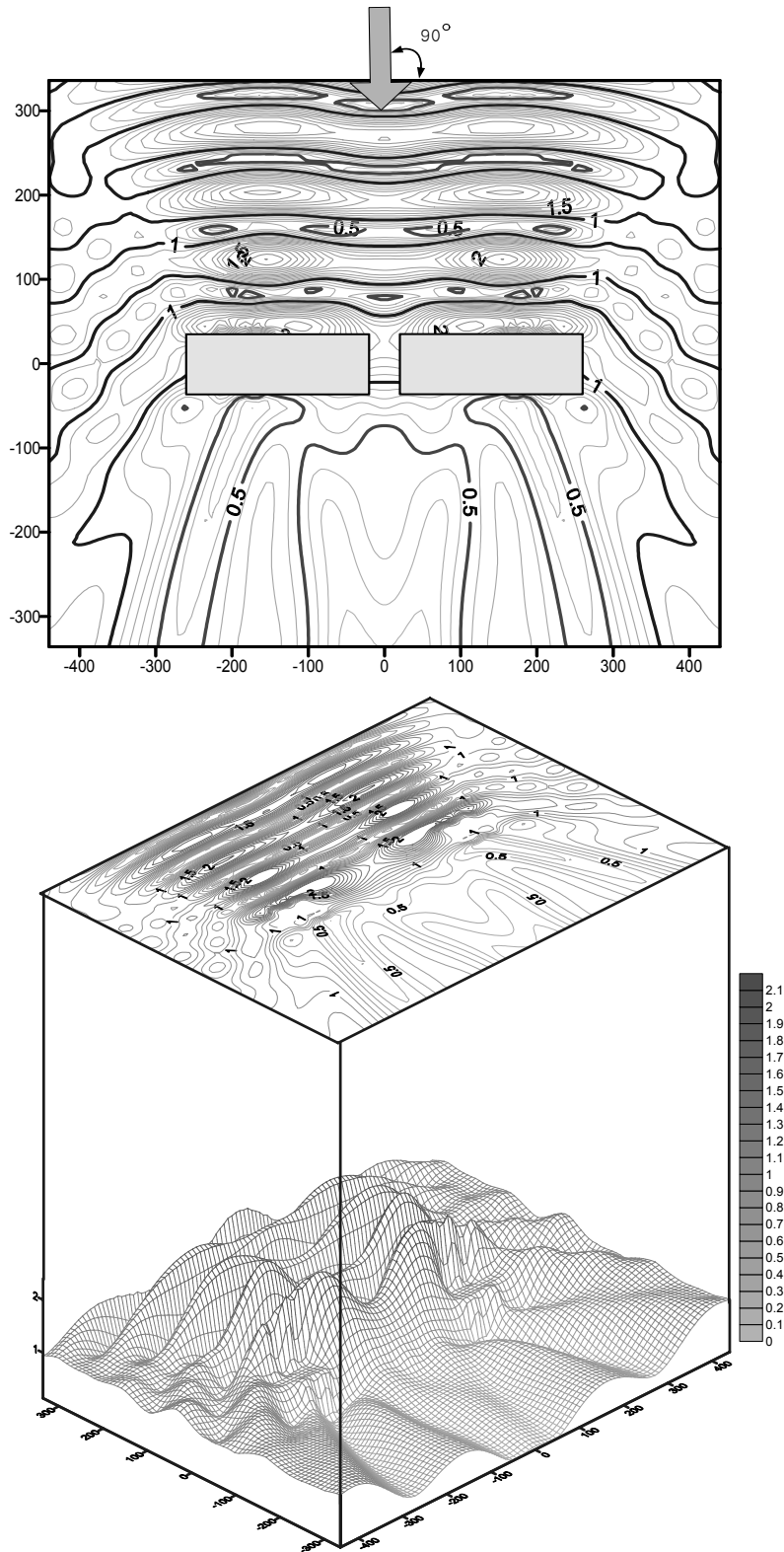
여기서, 주기가 가장 짧은  $\sigma^2 h/g = 3.776$ 인 Fig. 5.8(a)의 경우와 주기가 가장 긴  $\sigma^2 h/g = 1.678$ 인 Fig. 5.8(b)를 비교하면  $\sigma^2 h/g = 3.776$ 의 경우가 개구부 배후해역에서는 약간 높은 파고치를 나타내지만, 부소파제의 배후에서는 Fig. 5.8(b)보다 좋은 결과를 나타낸다. 여기서, Fig. 5.8(b)의 경우가 개구부 배후해역에서  $\sigma^2 h/g = 3.776$ 인 Fig. 5.8(a)보다 향상된 정온도를 나타내는 이유는 단주기파랑일수록 부체전면에서 반사파에



의한 부분중복파가 많이 형성되므로, 개구부를 통한 부분중복파의 유입이 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

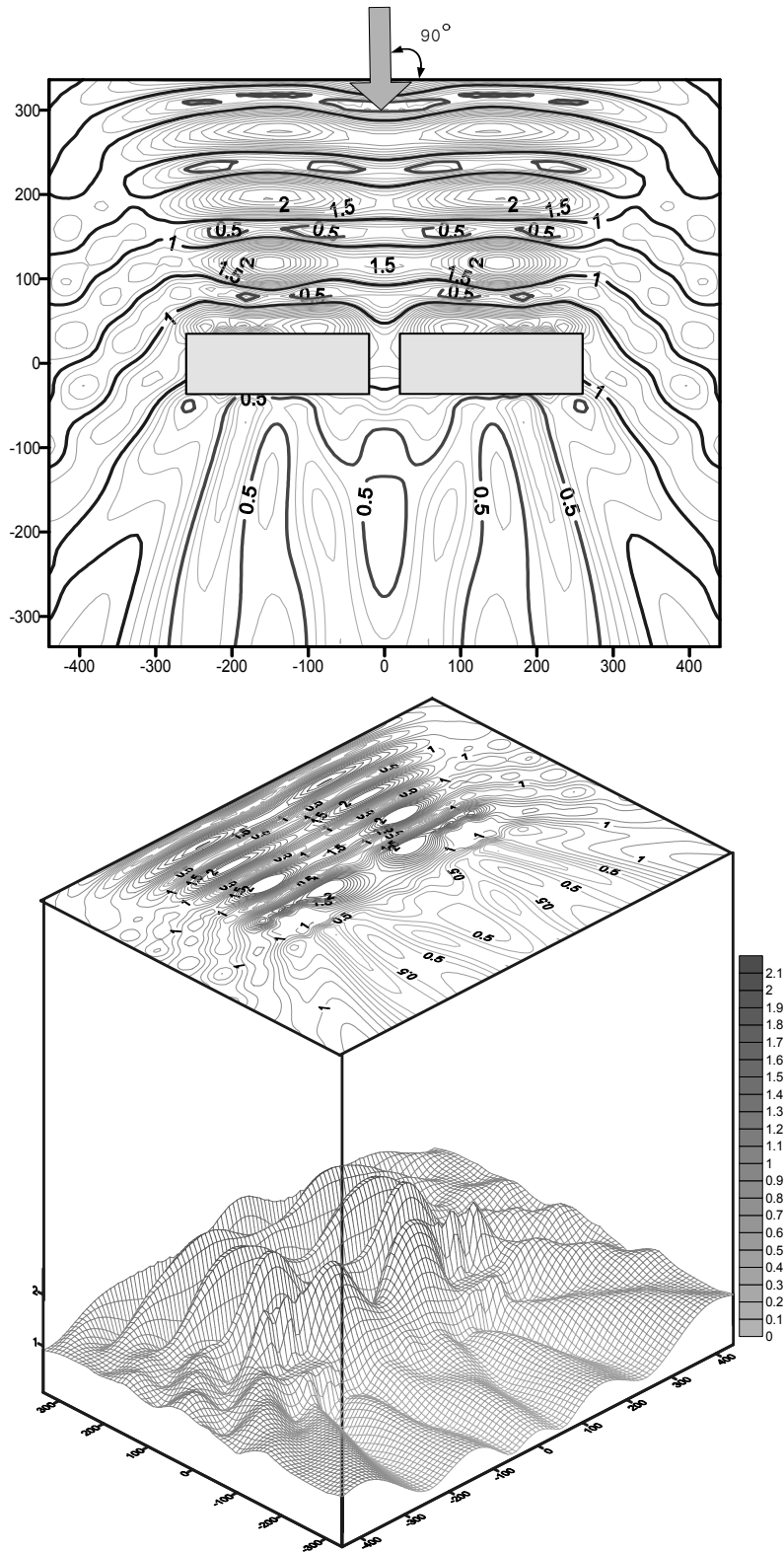
(d) 폭의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.9(a), (b)의 경우는 주기  $\sigma^2 h/g = 2.417$ 일때 부소파제의 폭을 각각  $b/a = 0.2$ ,  $0.4$ 로 변화시킨 경우의 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서,  $b/a = 0.3$ 인 Fig. 5.6(b)를 포함하여 검토하면, 무차원파고분포의 특성으로 폭이 증가함에 따라 반사특성이 상이함으로서 부소파제의 전면에 형성되는 부분중복파의 양상이 다르다. 이 계산의 범위내에서는 Fig. 5.9(b)의 경우가 부소파제의 배후해역에서는 정온도가 가장 우수한 것으로 나타나지만, 개구부를 통한 파랑에너지의 유입이 많아져 개구부 배후해역에서 정온도가 악화되는 것을 확인할 수 있다.



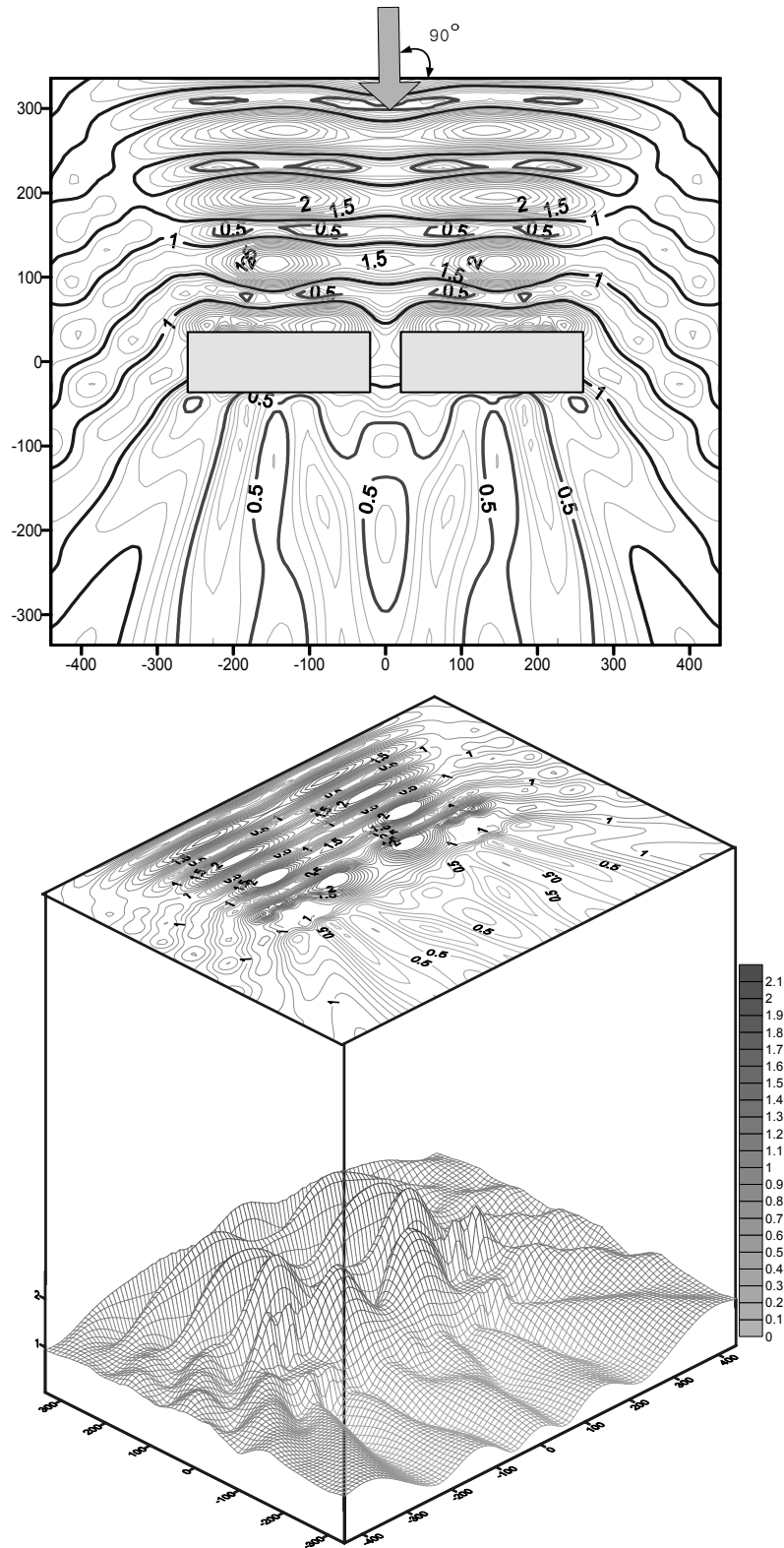
(a)  $q = 0.25$ .

Fig. 5.6. 홀수의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



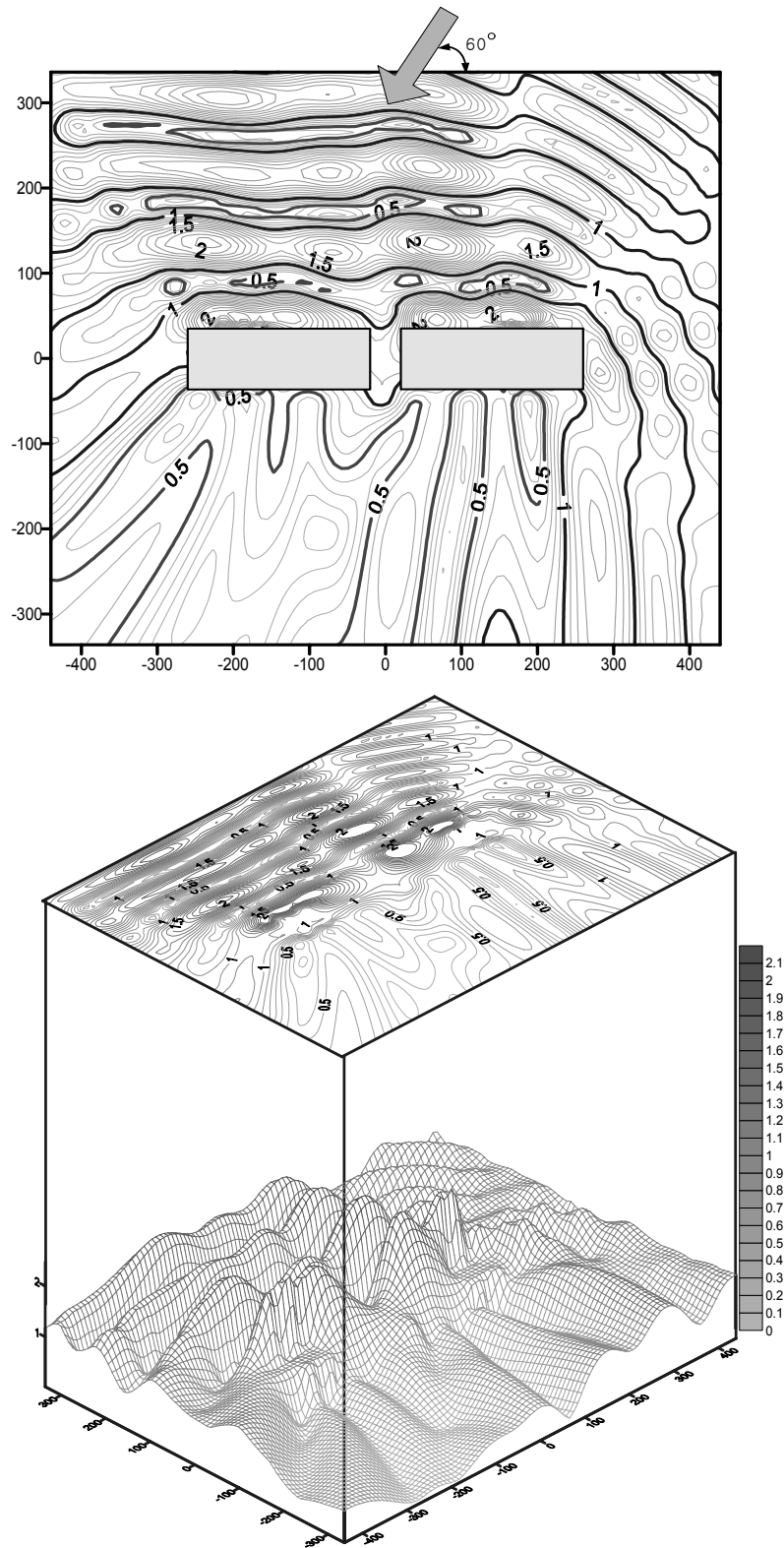
(b)  $q = 0.35$ .

Fig. 5.6. 홀수의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



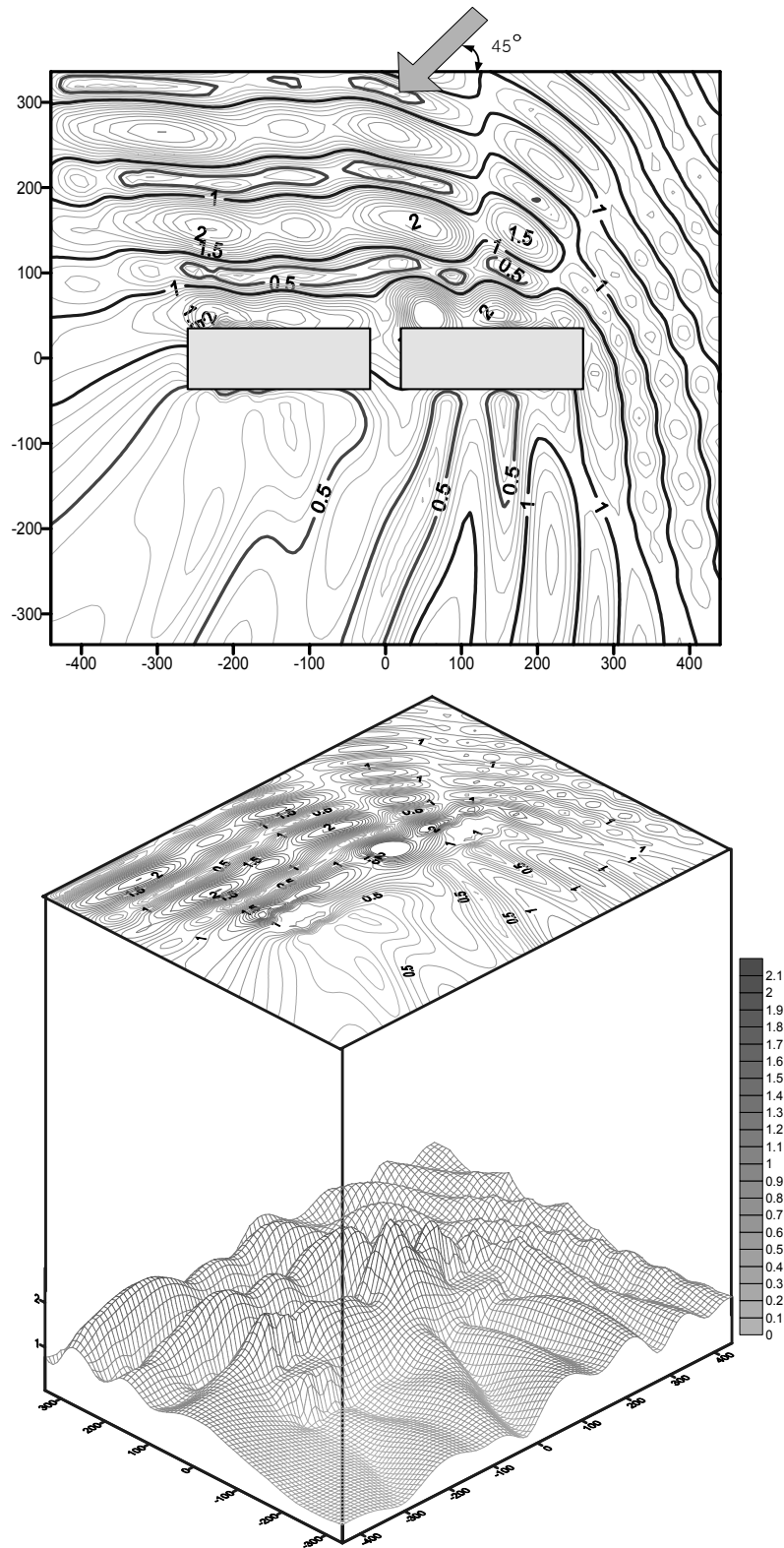
(c)  $q = 0.45$ .

Fig. 5.6. 홀수의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



(a)  $\theta = 60^\circ$ .

Fig. 5.7. 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, q = 0.35, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



(b)  $\theta = 45^\circ$ .

Fig. 5.7. 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, q = 0.35, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .

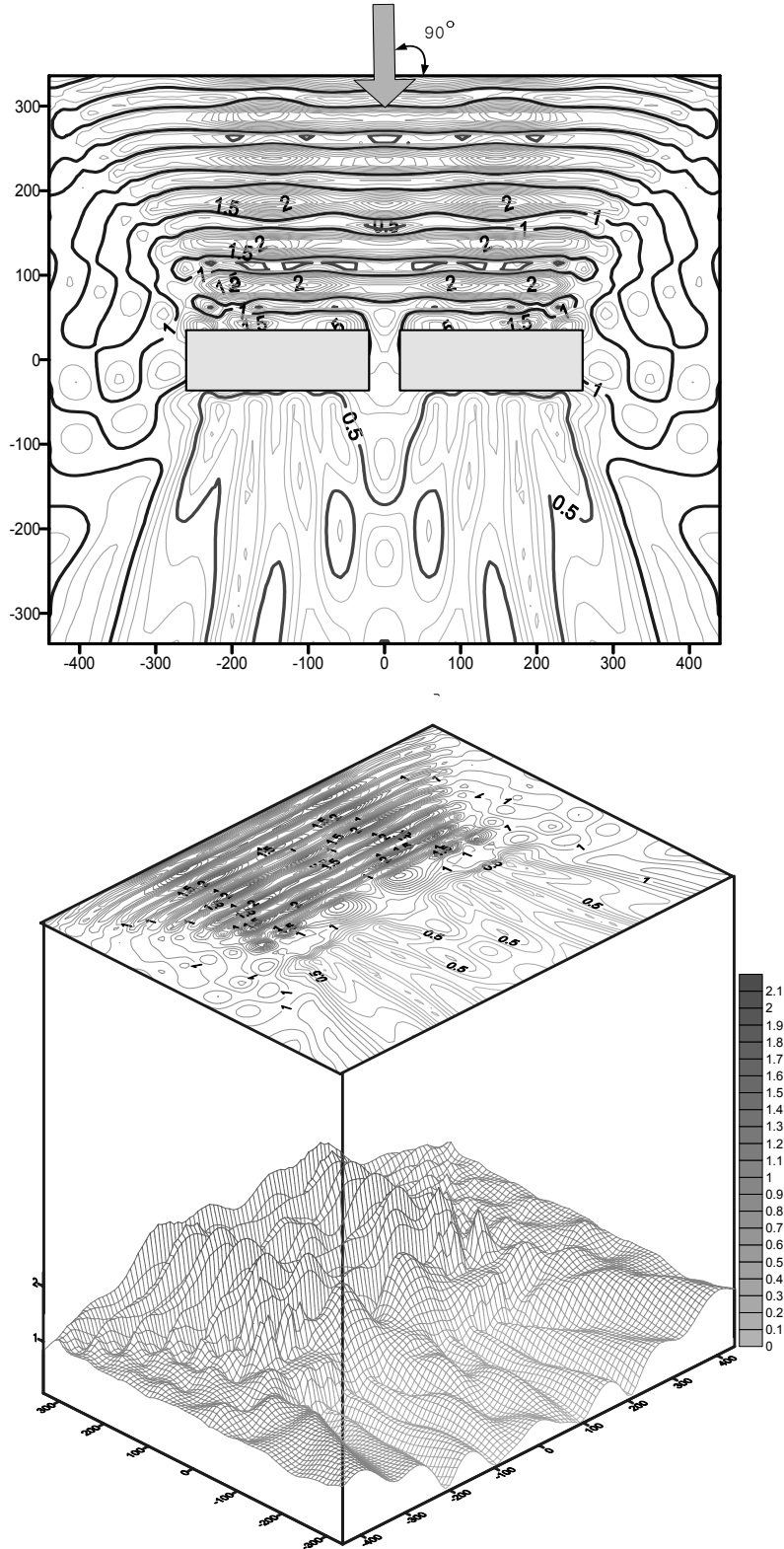
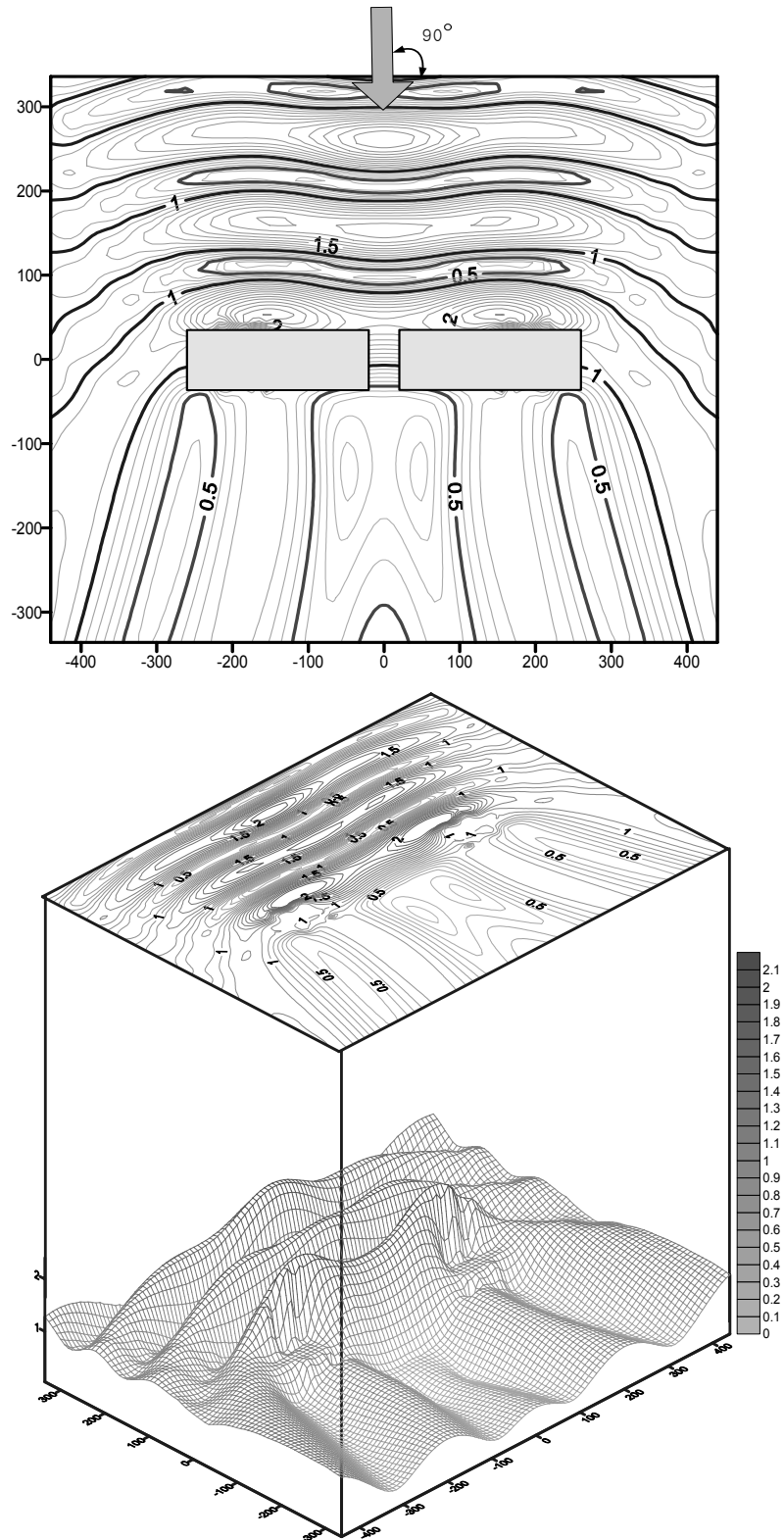


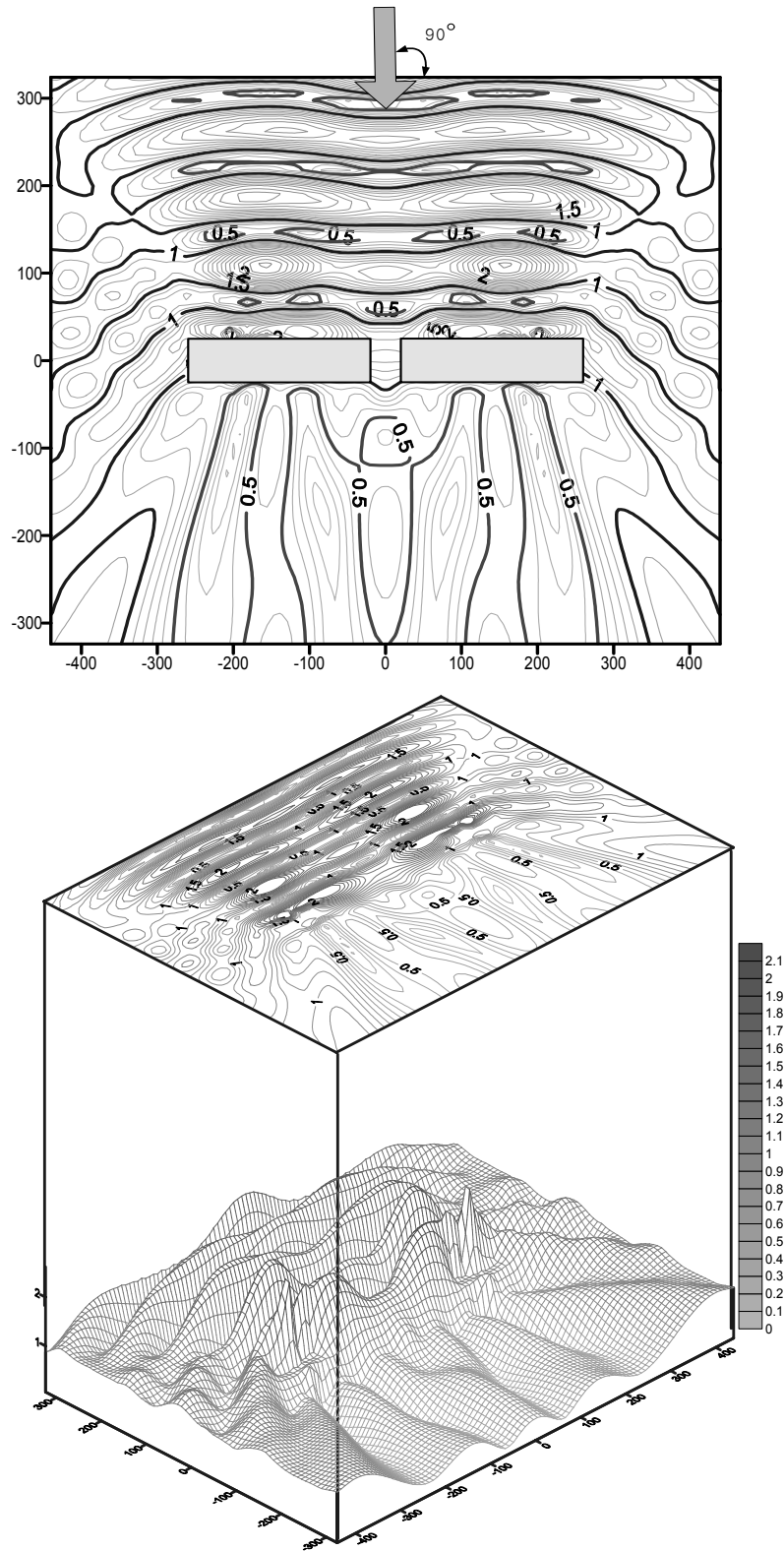
Fig. 5.8. 주기의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, q = 0.35, \theta = 90^\circ)$ .



(b)  $\sigma^2 h/g = 1.678$ .

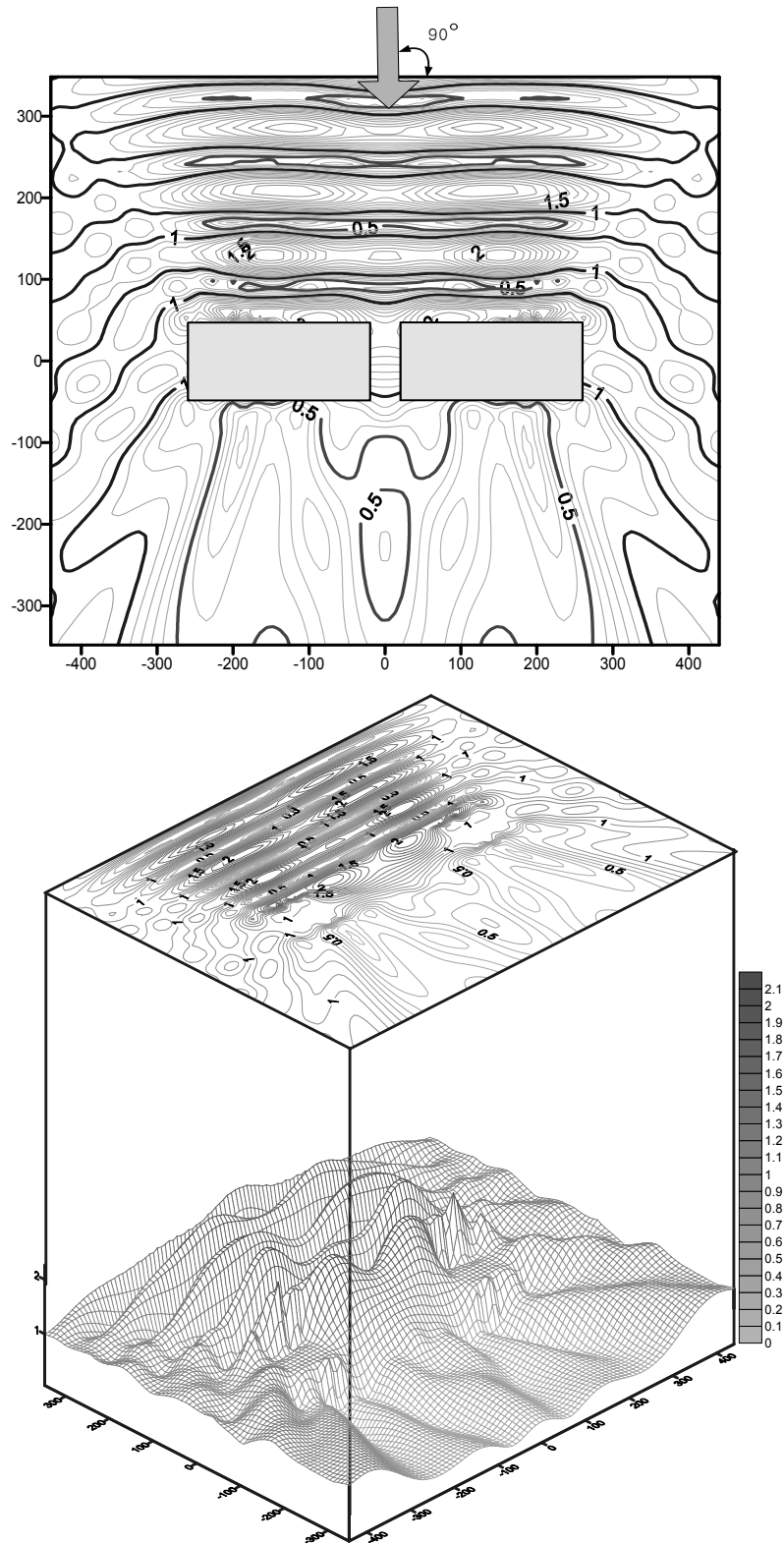
Fig. 5.8. 주기의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)  
 ( $h=60\text{cm}$ ,  $a/h=2.0$ ,  $b/a=0.3$ ,  $c/a=0.167$ ,  $q=0.35$ ,  $\theta=90^\circ$ ).





(a)  $b/a = 0.2$ .

Fig. 5.9. 폭의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, c/a = 0.167, q = 0.35, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



(b)  $b/a = 0.4$ .

Fig. 5.9. 폭의 변화에 따른 무차원파고분포(돌핀계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, c/a = 0.167, q = 0.35, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .

### 5.3.4 Catenary계류 부소파제의 해석결과

이 계산에서 수행되는 계류라인의 조건 및 배치상황은 Fig. 5.5에 제시하는 바와 같고, 수중에서 계류라인의 단위길이당 비중은 1.2로 하였다.

#### (1) 파랑변형

##### (a) 홀수의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.10(a)~(c)는 Catenary계류된 부소파제의 무차원홀수가 각각  $q=0.25, 0.35, 0.45$ 인 경우에 있어서 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 전술한 돌핀계류 부소파제와 마찬가지로 부소파제에 의한 입사파의 반사로 인한 부분중복파가 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 돌핀계류 부소파제와 마찬가지로 홀수가 깊을수록 개구부를 통한 파랑에너지의 유입으로 정온도가 악화되는 것을 확인할 수 있으며, 전체적으로 연직운동만을 허용하는 돌핀계류 부소파제에 비해 파랑제어효과가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

##### (b) 입사파향각의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.11(a), (b)는 Catenary계류된 부소파제에 있어서 입사파향각을 각각  $\theta=60^\circ, 45^\circ$ 로 변화시킨 경우에 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서, Fig. 5.7(a), (b)의 돌핀계류 부소파제와 거의 비슷한 파고분포를 나타내지만, Fig. 5.11(a), (b)의 경우가 배후해역에서 회절계수가 약간 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 경사입사파에 의한 부소파제 I과 II의 횡방향 운동변위에 의한 간섭현상으로 판단된다.

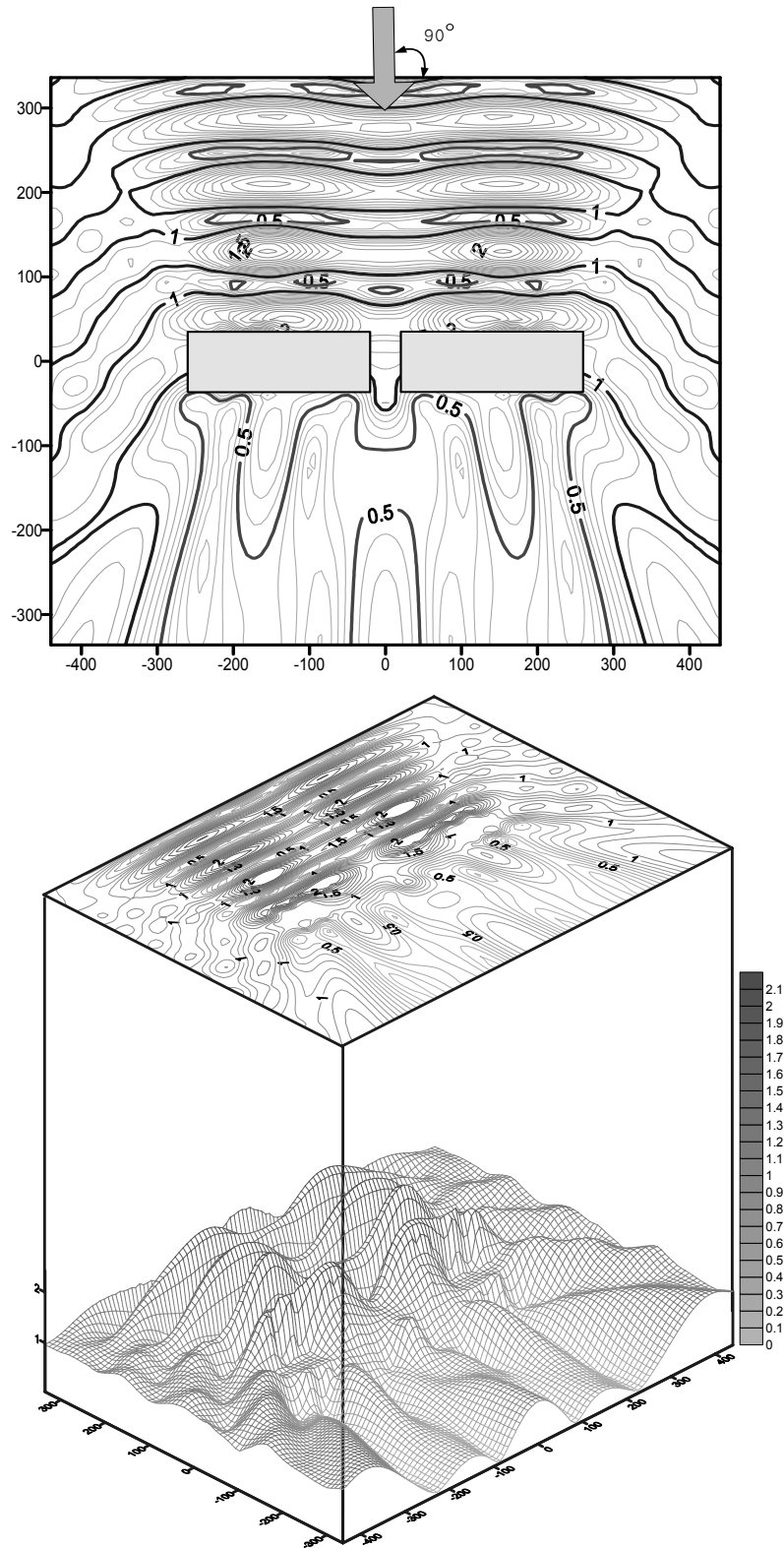
##### (c) 입사주기의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.12(a), (b)는 입사주기가 각각  $\sigma^2 h/g=1.678, 1.233$ 인 경우에 대한 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서,  $\sigma^2 h/g=2.417$ 인 Fig. 5.10(b)를 포함하여 검토하면  $\sigma^2 h/g=1.678$ 인 Fig. 5.12(a)의 정온도가 가장 좋은 것으로 나타난다. 일반적으로 부소파제는 주기가 긴 파랑에 대해서는 파랑제어효과가 떨어지는 것으로 나타나지만, 여기서  $\sigma^2 h/g=1.678$ 의 경우가 가장 좋은 결과를 나타내는 것은 전술한 2차원수리실험결과에서 확인된 바와 같이 폰툰형 부소파제의 고유주기에 해당되는 것으로 이를 파장에 대한 부체폭의 비로 나타내면  $L/B \approx 3.2$ 에서 부소파제의 회전운동 및 연직운동이 크게 되어, 동시에 전달율이 극소치를 나타내기 때문으로 판단된다. 또, 주기가 가장 짧은  $\sigma^2 h/g=2.417$ 인 Fig. 5.10(b)의 경우와 주기가 가장 긴  $\sigma^2 h/g=1.233$ 인 Fig.

5.12(b)를 비교하면  $\sigma^2 h/g = 2.417$ 의 경우가 개구부 배후해역에서는 약간 높은 파고치를 나타내지만, 부소파제의 배후에서는 Fig. 5.12(b)보다 좋은 결과를 나타낸다. 여기서, Fig. 5.12(b)의 경우가 개구부 배후해역에서  $\sigma^2 h/g = 2.417$ 인 Fig. 5.10(b)보다 나은 정온도를 나타내는 이유는 단주기파랑일수록 부체 전면에서 반사파에 의한 부분중복파가 많이 형성되므로 개구부를 통한 부분중복파의 유입이 많아지기 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 돌핀계류 부소파제에서 입사주기  $\sigma^2 h/g = 1.678$ 인 Fig. 5.8(b)의 경우와 동일한 조건의 Catenary계류된 부소파제의 Fig. 5.12(a)의 경우를 비교하면 Catenary계류된 부소파제의 배후해역이 정온도가 월등히 좋다는 것을 확인할 수 있다. 이는  $\sigma^2 h/g = 1.678$ 의 경우가 Catenary계류된 부소파제의 고유주기와 일치하여 연직운동 및 회전운동이 크게 되며, 이에 따라 발생하는 발산파와 부소파제를 통과한 전달파와의 위상차에 의해 전달파가 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

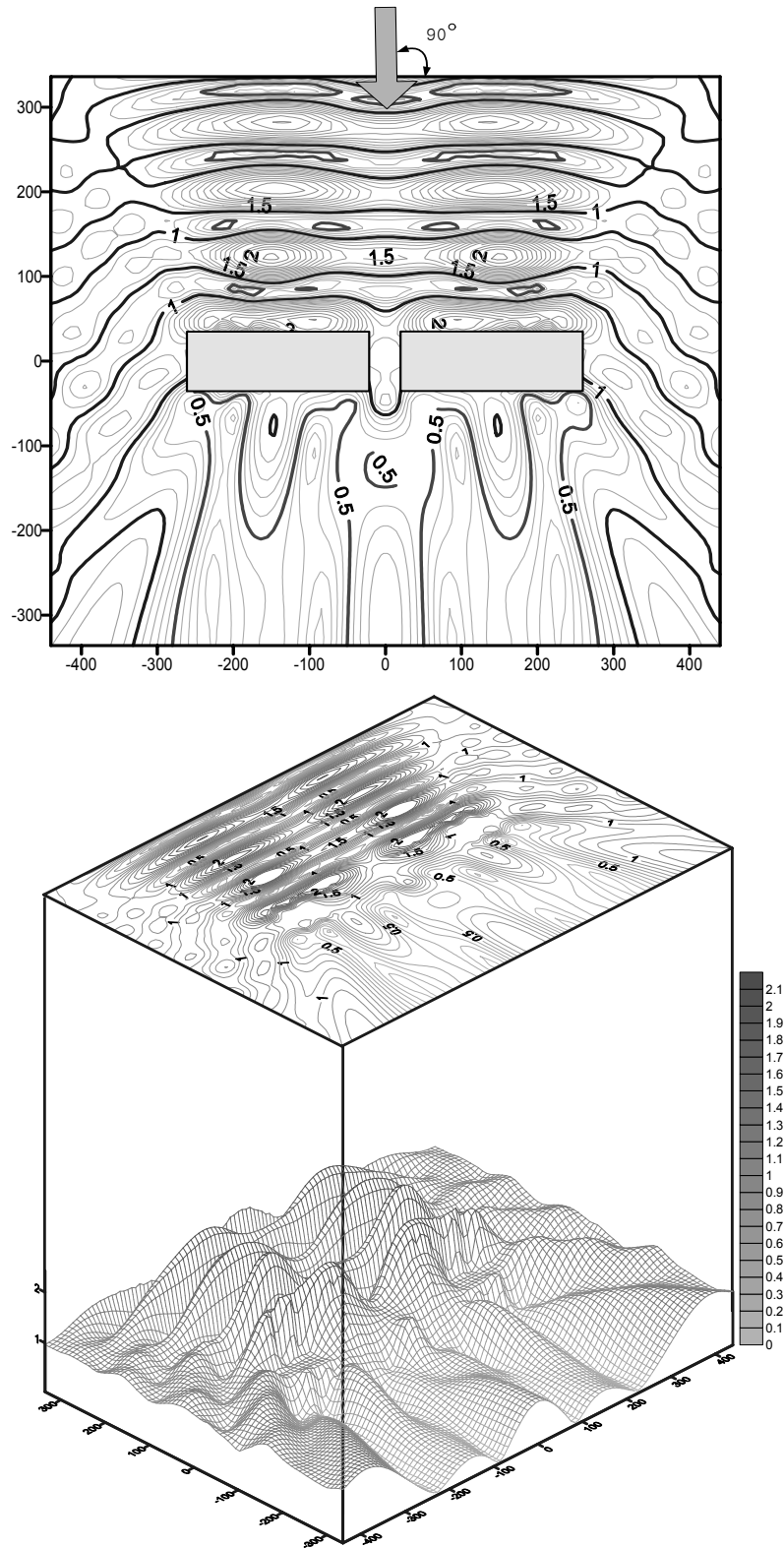
#### (d) 폭의 변화에 따른 파랑변형

Fig. 5.13(a), (b)의 경우는 주기  $\sigma^2 h/g = 1.678$ 일 때 부소파제의 폭을 각각  $b/a = 0.2$ ,  $0.4$ 로 변화시킨 경우의 회절계수의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서,  $b/a = 0.3$ 인 Fig. 5.12(a)를 포함하여 검토하면, 부체폭이  $b/a = 0.3$ 인 Fig. 5.12(a)의 경우가 가장 정온도가 좋은 것으로 나타난다. 이는 전술하였던 파장에 대한 부체폭의 비  $L/B \approx 3.2$ 일 때 전달율이 최소가 되기 때문이다. 그리고, 폭이  $b/a = 0.2$ 인 Fig. 5.13(a)의 경우와  $b/a = 0.4$ 인 Fig. 5.13(b)의 경우를 비교하면 부소파제의 폭이 좁은 경우가 개구부 배후에서 정온도는 좋은 값을 나타내지만, 부소파제 배후에서는 폭이 넓은 경우가 나은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그 이유는 부소파제의 폭의 변화에 의한 부분중복파의 영향으로 판단된다. 이와 같이 부소파제의 폭의 변화는 일반적으로 입사파랑의 파장과 밀접한 관계가 있으며, 폭이 넓을수록 파랑제어기능이 탁월하다고는 말할 수 없다. 따라서, 2차원해석으로부터 현지의 파랑조건에 가장 적합한 부소파제의 폭을 산정한 후에 3차원적인 파랑변형을 검토하는 것이 타당할 것이다. 그리고, 부소파제의 설계에서 가장 유의하여야 할 것 중에 하나인 입사파장과 부소파제의 폭과의 관계로부터 발생할 수 있는 공진문제를 검토하여야 한다.



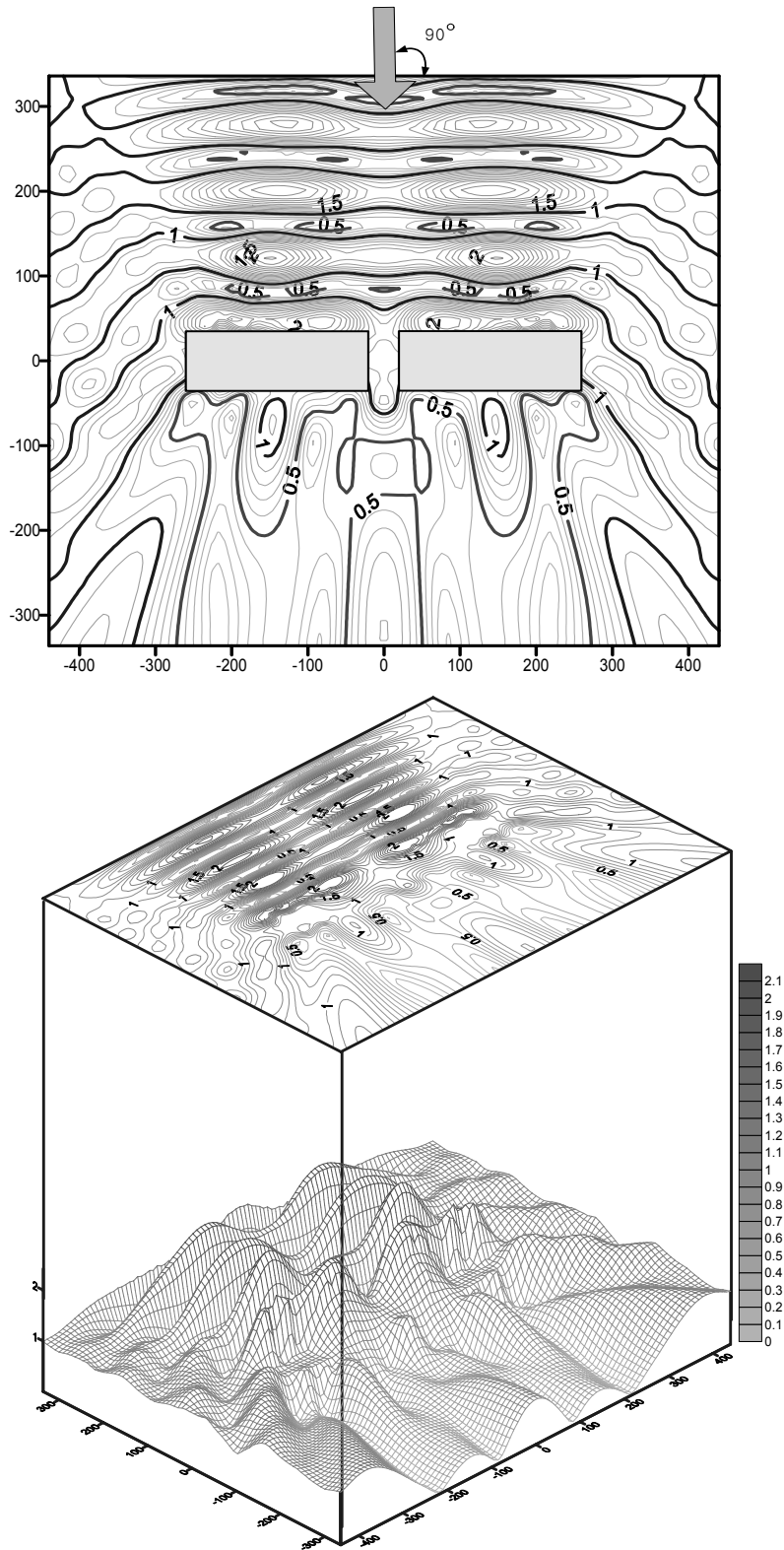
(a)  $q = 0.25$ .

Fig. 5.10. 홀수의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



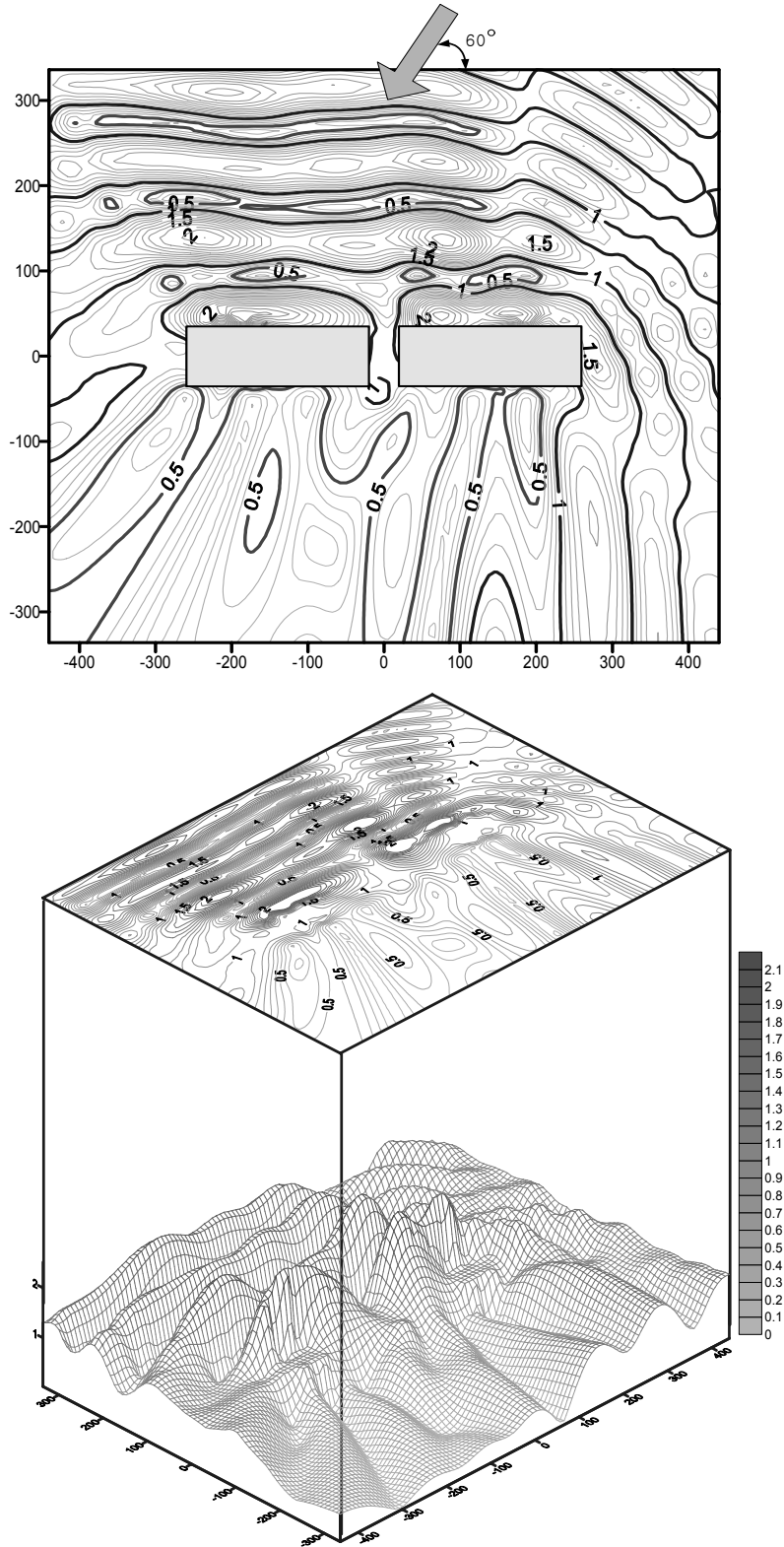
(b)  $q = 0.35$ .

Fig. 5.10. 홀수의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



(c)  $q = 0.45$ .

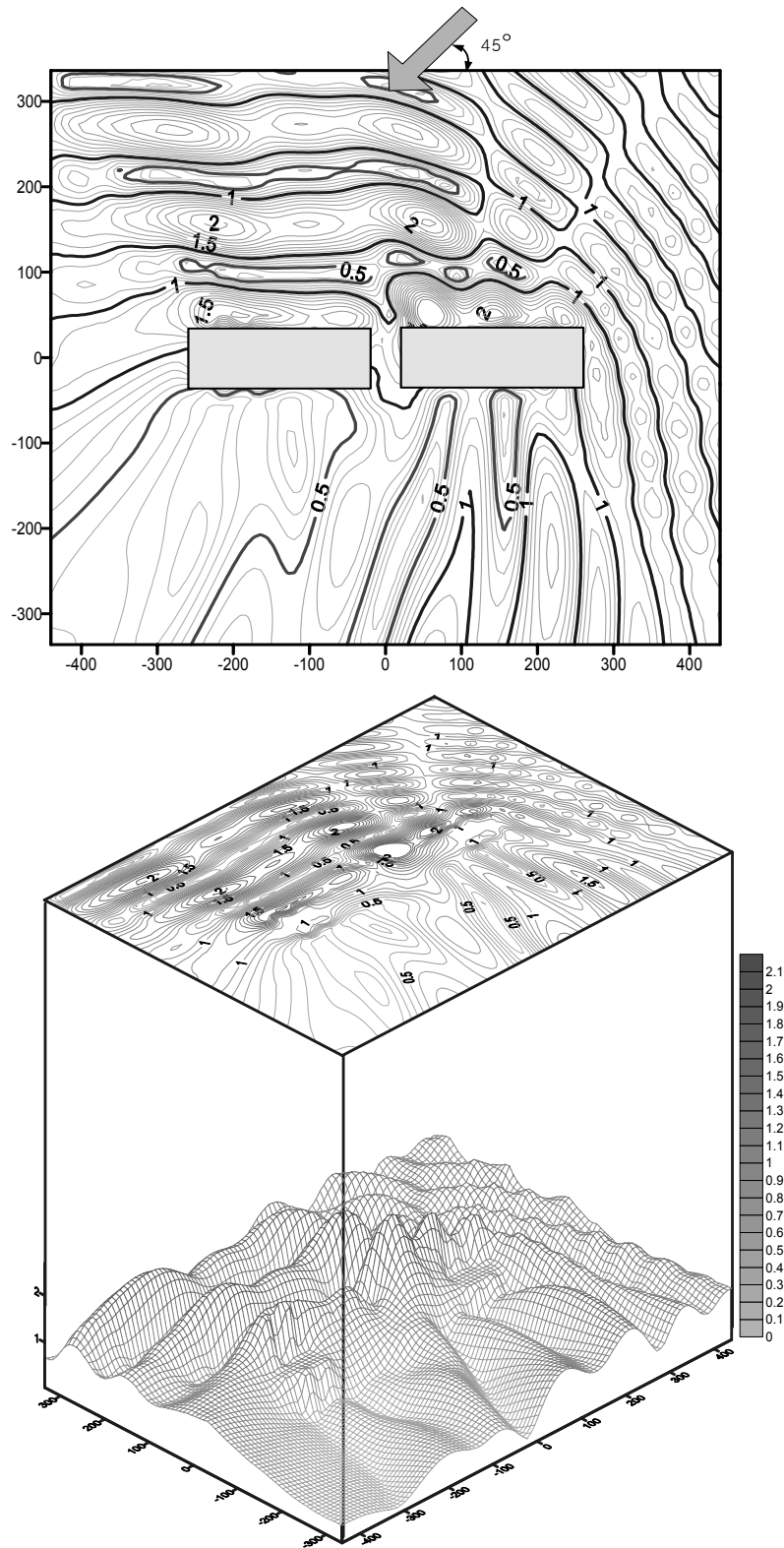
Fig. 5.10. 흘수의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



(a)  $\theta = 60^\circ$ .

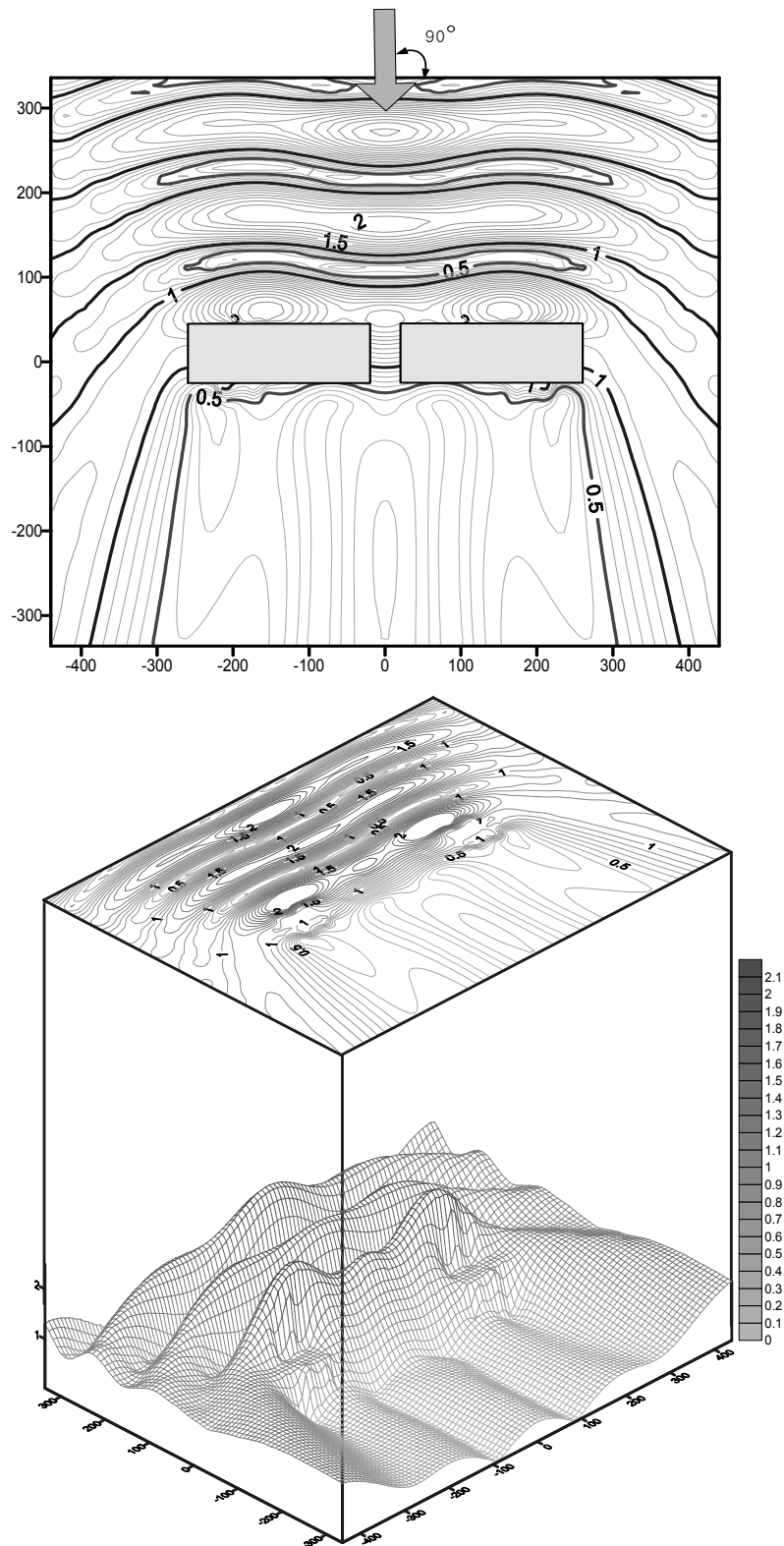
Fig. 5.11. 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenaty계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, q = 0.35, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .





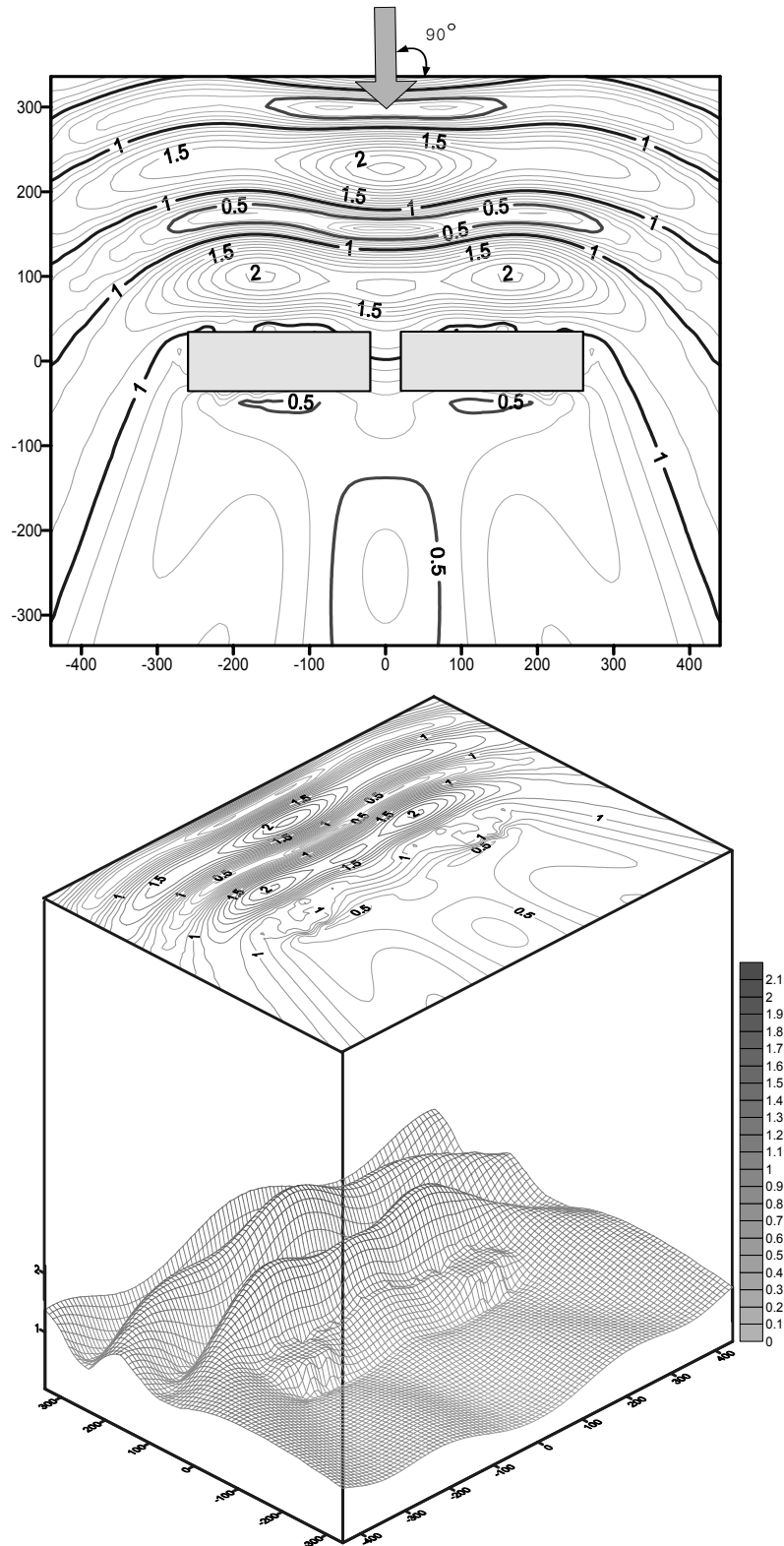
(b)  $\theta = 45^\circ$ .

Fig. 5.11. 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenaty계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, q = 0.35, \sigma^2 h/g = 2.417)$ .



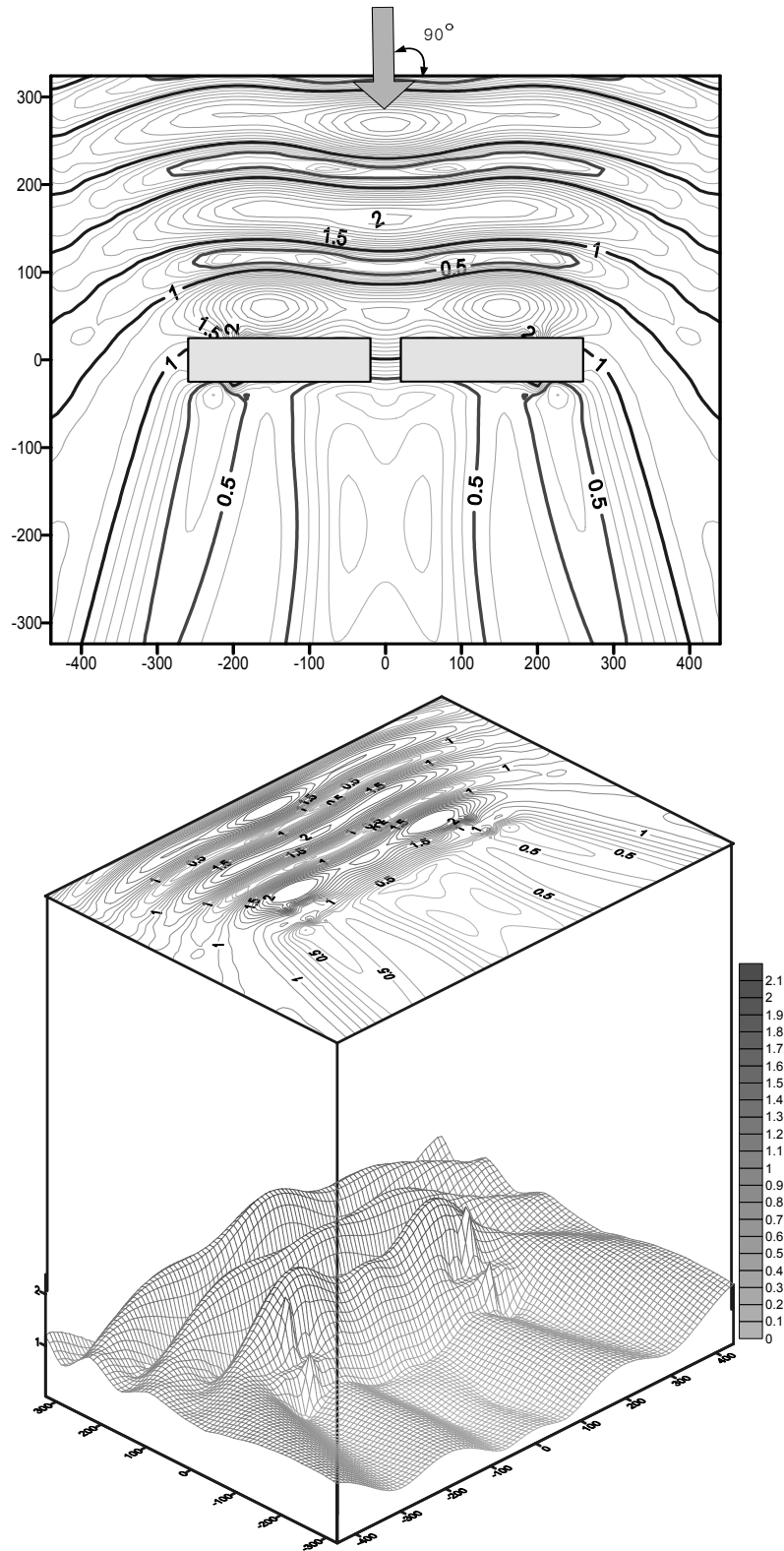
(a)  $\sigma^2 h/g = 1.678$ .

Fig. 5.12. 주기의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)(계속)  
 ( $h = 60\text{cm}$ ,  $a/h = 2.0$ ,  $b/a = 0.3$ ,  $c/a = 0.167$ ,  $q = 0.35$ ,  $\theta = 90^\circ$ ).



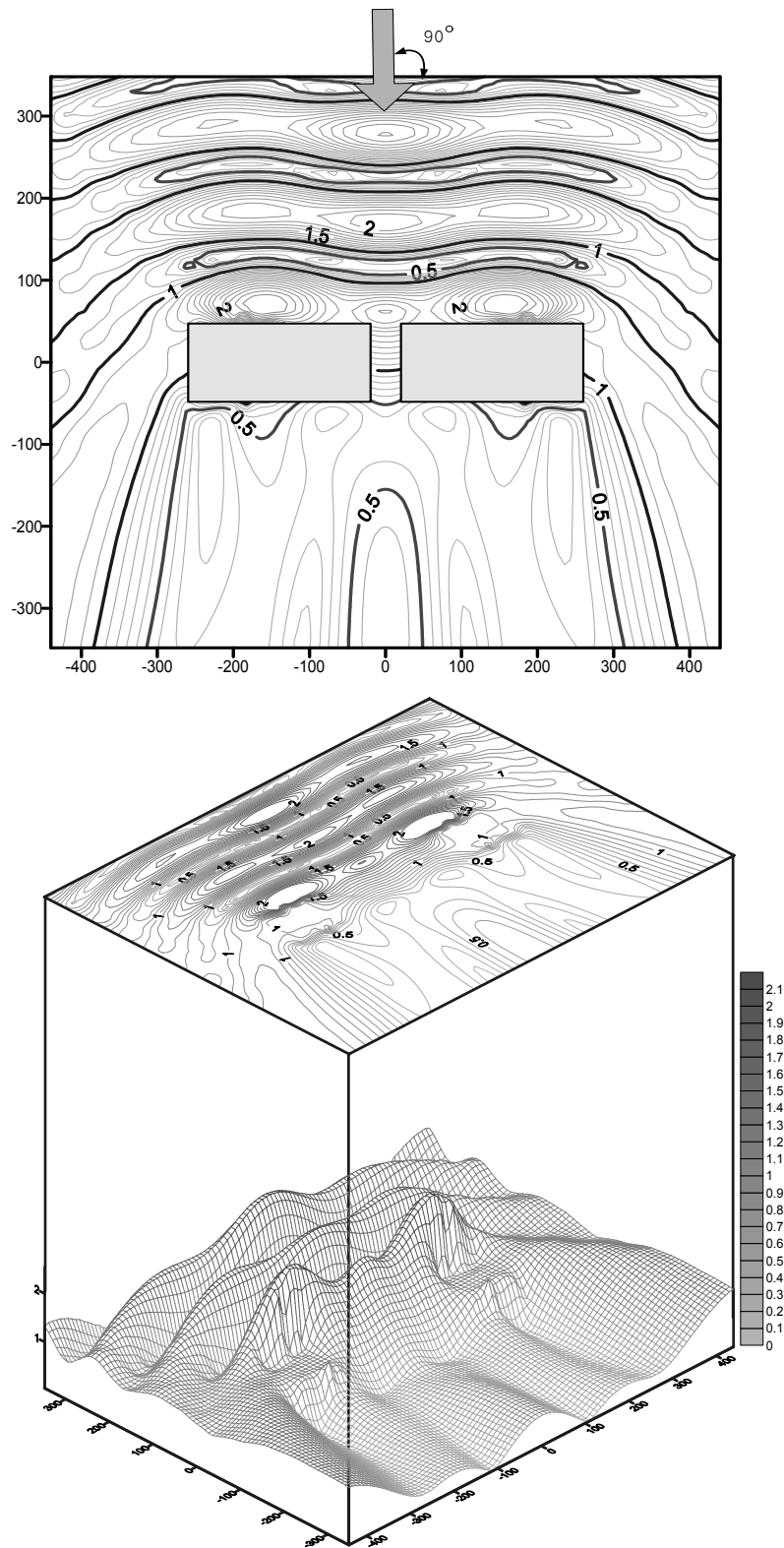
(b)  $\sigma^2 h/g = 1.233$ .

Fig. 5.12. 주기의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, b/a = 0.3, c/a = 0.167, q = 0.35, \theta = 90^\circ)$ .



(a)  $b/a = 0.2$

Fig. 5.13. 폭의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)(계속)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, c/a = 0.167, q = 0.35, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 1.678)$ .



(b)  $b/a = 0.4$

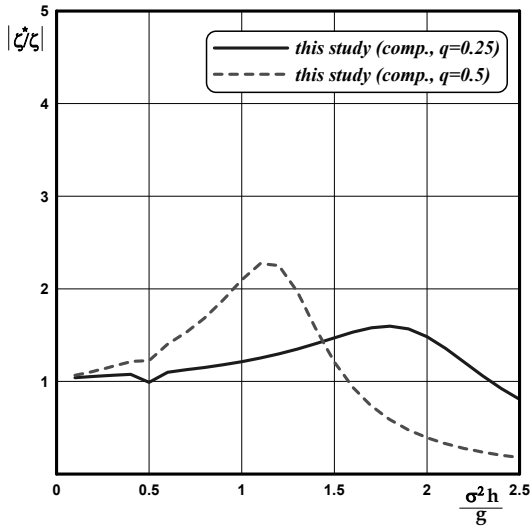
Fig. 5.13. 폭의 변화에 따른 무차원파고분포(Catenary계류 부소파제)  
 $(h = 60\text{cm}, a/h = 2.0, c/a = 0.167, q = 0.35, \theta = 90^\circ, \sigma^2 h/g = 1.678)$ .

## (2) 동적거동

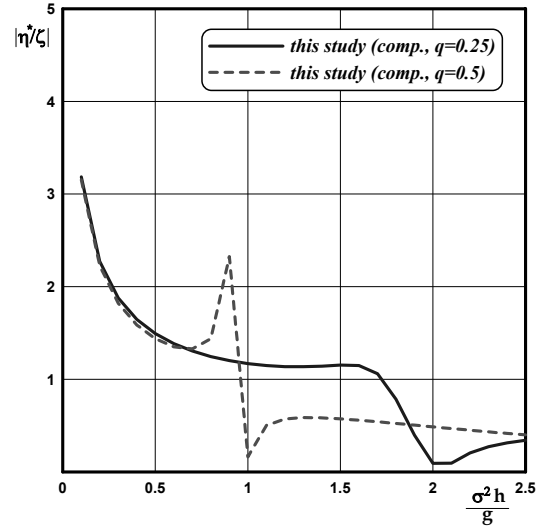
다음의 Fig. 5.14(a)~(c)는 Catenary계류된 1基의 부소파제에 있어서, 무차원홀수가 각각  $q=0.25, 0.5$ 인 경우에 있어서 직각입사파랑에 대해 무차원주기의 변화에 따른 부소파제의 무차원운동량(Heaving, Swaying, Rolling)의 수치해석결과이다. 부소파제의 폭, 길이 및 중량과 관성모멘트 등은 井島 등(1975)의 자유부체와 긴장계류된 부소파제의 경우와 동일하게 적용하였다. 결과를 살펴보면, 무차원홀수가 큰  $q=0.5$ 의 경우가  $q=0.25$ 의 경우에 비해 무차원운동량의 피크값이 장주기측으로 이동하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 홀수가 증가할수록 유체저항이 커지기 때문에 공진점이 장주기측으로 이동하는 것으로 판단된다. Fig. 5.3에 나타난 井島 등(1975)의 자유부체에 대한 수치해석결과와 비교하면 Swaying과 Rolling에서 부소파제의 공진점이 약간 장주기 쪽으로 이동한 경향이 있으나 전체적으로 유사한 거동을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5.15(a)~(e)는 입사파향각을 각각  $\theta=90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ 로 변화시킨 경우에 있어서 무차원주기의 변화에 따른 무차원운동량(Heaving, Swaying, Rolling, Surging, Pitching, Yawing)에 대한 수치해석결과를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, Fig. 5.15(a)~(c)의 Heaving, Swaying, Rolling에 대한 무차원운동량은 파가 직각으로 입사하는 경우에 가장 크며, 입사파향각이 작아질수록 운동량도 감소하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 5.15(a)에서 입사파향각이  $\theta=60^\circ$ 와  $\theta=45^\circ$ 의 경우는 부소파제 I과 부소파제 II에 도달하는 파랑의 위상차와 개구부에서의 간섭으로 단주기측에서는 미소한 운동량의 차이를 나타내지만, 부소파제의 파랑제어효과가 없는 장주기측으로 이동하면서 같은 운동을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5.15(d)~(e)의 전체적인 결과를 살펴보면 파가 직각으로 입사하는 경우에는 수평방향으로의 파랑의 작용이 없기 때문에 운동량이 아주 미소한 것을 확인할 수 있고, 입사파향각이  $\theta=60^\circ$ 의 경우가  $\theta=45^\circ$ 의 경우에 비해 단주기측에서는 약간 높은 운동량을 나타내지만, 장주기측으로 이동할수록 운동량이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 여기서, Fig. 5.15(e)의 경우는 부소파제 I에 비해서 부소파제 II의 공진점이 단주기측으로 이동되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 입사파향각이 작을수록 더욱 단주기측으로 이동된 것을 볼 수 있다.

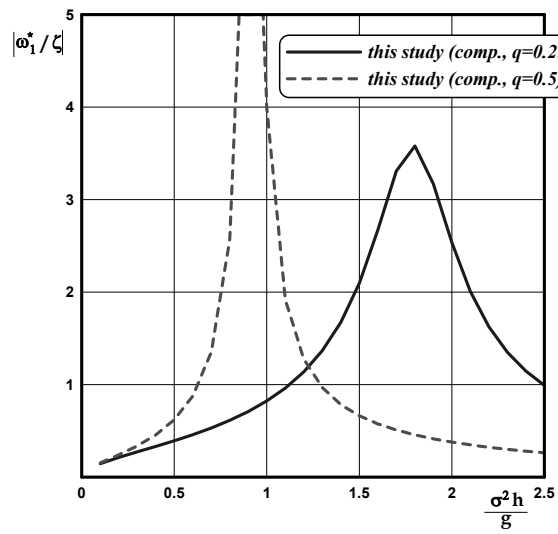
이상의 수치해석 결과들을 검토한 결과, 실해역에 건설되는 2基의 부소파제가 간섭에 의해 상이한 동적거동을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 여기서 부소파제에 대해 파가 경사지게 입사하는 경우에는 단주기측에서 간섭효과가 더욱 많이 발생하는 것을 알 수 있으며, 부소파제의 파랑제어효과를 기대하기 힘든 장주기영역에서는 거의 동일한 거동을 나타내는 것을 확인할 수 있다.



(a) Heaving.

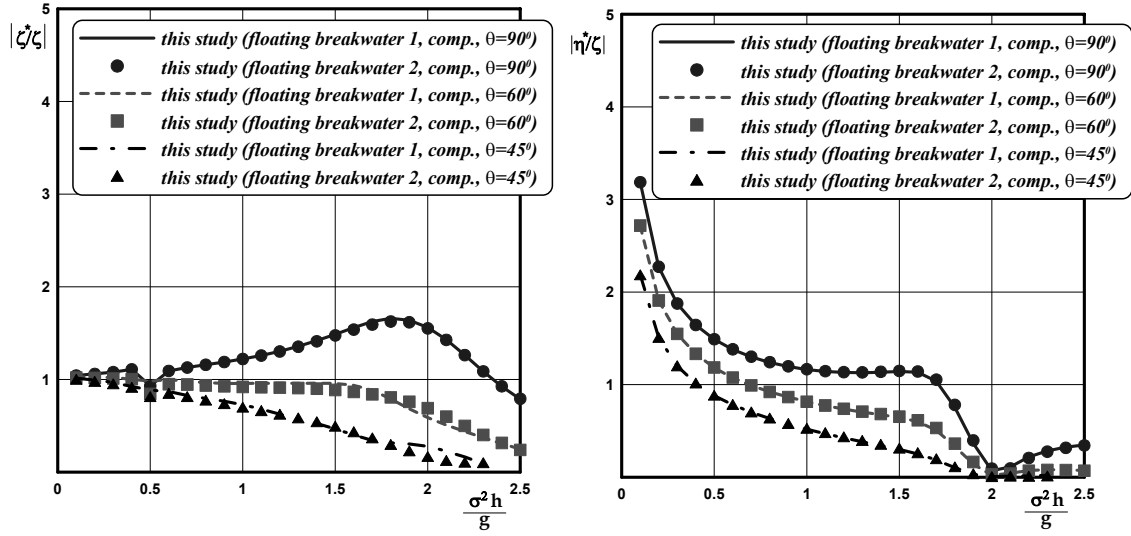


(b) Swaying.



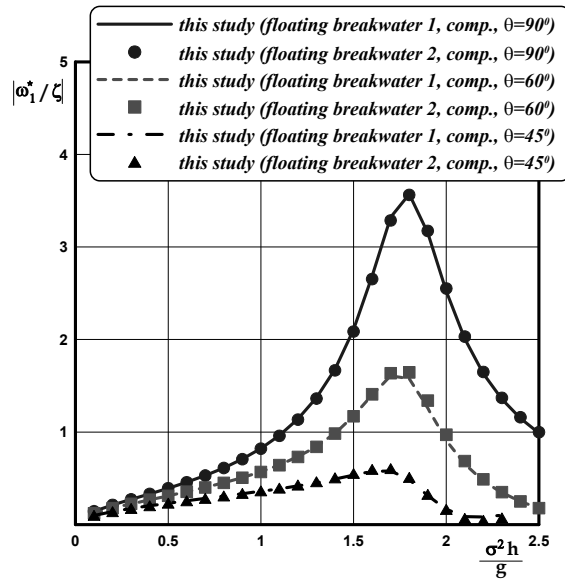
(c) Rolling.

Fig. 5.14. 1基 Catenary계류 부소파제의 무차원운동량  
( $h = 60\text{cm}$ ,  $a/h = 2.0$ ,  $b/a = 0.3$ ,  $\theta = 90^\circ$ ).



(a) Heaving.

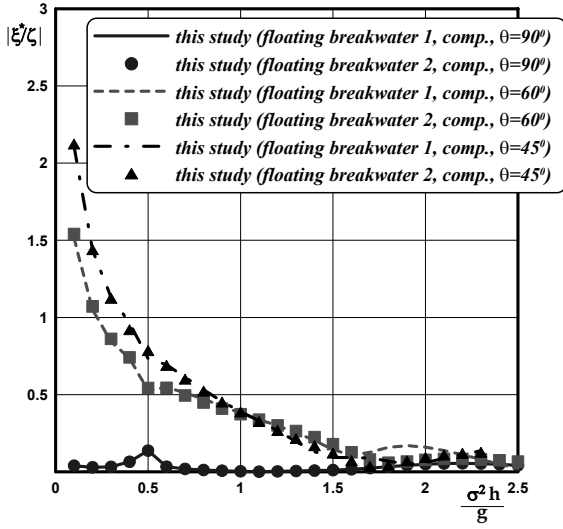
(b) Swaying.



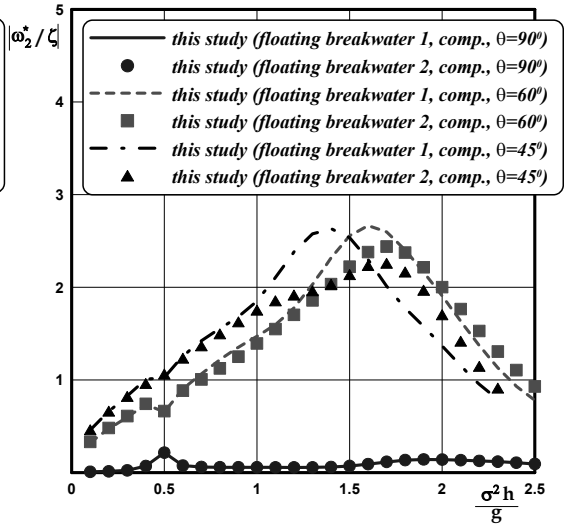
(c) Rolling.

Fig. 5.15. 2基 Catenary계류 부소파제의 무차원운동량(계속)  
( $h = 60\text{cm}$ ,  $q = 0.35$ ,  $a/h = 2.0$ ,  $b/a = 0.3$ ,  $c/a = 0.167$ ).

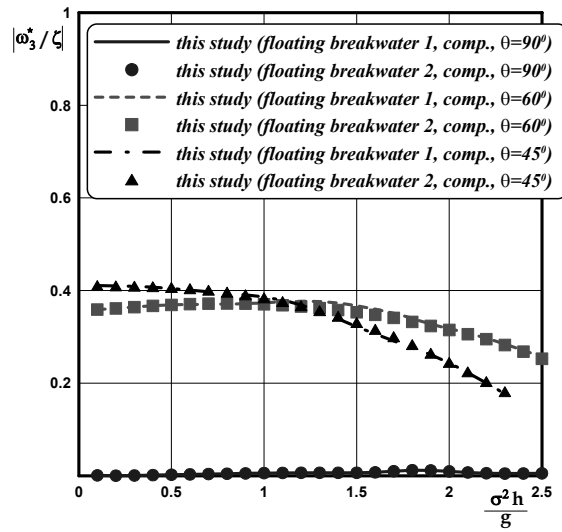




(d) Surging.



(e) Pitching.



(f) Yawing.

Fig. 5.15. 2基 Catenary계류 부소파제의 무차원운동량  
( $h = 60\text{cm}$ ,  $q = 0.35$ ,  $a/h = 2.0$ ,  $b/a = 0.3$ ,  $c/a = 0.167$ ).

## 6. 부소파제의 3차원해석(2)

### 6.1 이론적 배경

부소파제의 기능성에 관한 파랑제어능력의 평가는 제 3장의 2차원해석과 제 4장의 평면파랑변형의 해석에서 평가될 수 있지만, 부소파제의 안정성에 관련된 배치문제는 多基로 건설되는 부소파제의 운동으로 평가되어야 한다. 여기서, 제 4장에서 다룬 평면배치문제는 개구부의 영향 등에 관한 기능성에 관한 문제에 한정되어 있다. 제 5장에서 언급된 3차원해석은 폰툰형 부소파제에 있어서 안정성에 관한 동적거동의 문제를 다룰 수는 있지만, 형상이 복잡해지는 복합판형 부소파제와 같은 경우에는 적용상 많은 어려움이 있다. 따라서, 이 장에서는 복잡한 형상의 부소파제에도 적용이 가능한 파동장의 지배방정식과 구조물의 표면에서 경계조건을 제외한 모든 경계조건을 만족하는 3차원Green함수를 사용하여 구조물표면에 분포시키는 파원강도 분포함수를 매개로 한 경계적분방정식을 채용한다. 이는 일반적으로 3차원특이점분포법으로 알려져 있으며, 이로부터 1基의 복합판형 부소파제가 설치된 3차원파동장에 있어서 입사파랑의 주기 및 파향의 변화에 따른 3차원파랑변형 및 6개의 운동성분의 변동특성을 규명하고자 한다. 이와 같은 결과는 실험에서 충돌의 가능성을 예측하여 부소파제를 안정하게 배치하는 문제에 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

### 6.2 해석이론

#### 6.2.1 기본가정 및 경계조건

다음의 Fig. 6.1에 나타내는 바와 같이 일정수심  $h$ 의 3차원파동장에 설치된 임의형상의 부소파제를 고려한다. 여기서, 유체를 비압축성의 비회전운동으로 가정하면 파동운동은 미소진폭파이론으로 표현되며, 유체의 운동은 Surging, Heaving, Swaying, Rolling, Yawing, Pitching로 불리는 6개의 운동으로 부체운동이 발생한다. 따라서, 3차원파동장은 입사파랑, 고정시의 회절파랑 및 6개의 운동성분에 의한 발산파의 각 속도포텐셜로 구성된다.

부체의 미소진폭 주기운동은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$X_j = Re \{ X_j^0 e^{-i\sigma t} \} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (6.1)$$

여기서,  $X_j^0$  ( $j = 1, 2, 3$ )는 Surging, Heaving 및 Swaying에서 변위의 복소진폭을 나타내고,  $X_j^0$  ( $j = 4, 5, 6$ )은 Rolling, Yawing 및 Pitching에서 변위의 복소진폭으로 다음의 식과 같이 표현될 수 있다.

$$X_j^0 = a\Theta_j^0, \quad j = 4, 5, 6 \quad (6.2)$$

여기서,  $a$ 는 부소파제의 대표치수이고,  $\Theta_j^0$ 는 Rolling, Yawing 및 Pitching에서 복소각진 폭을 나타낸다.  $(x', y', z')$ 에 관한 각 운동변위를 Fig. 6.1에 나타내고 있다.

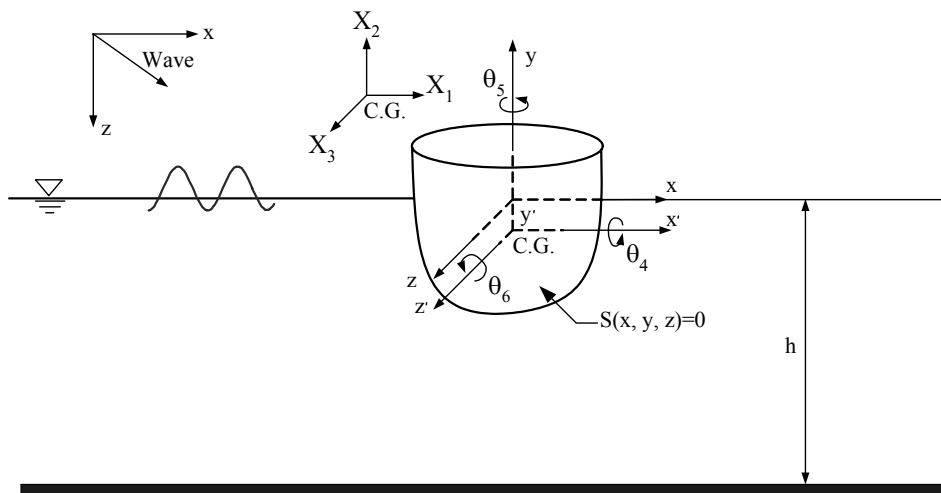


Fig. 6.1. 해석모델과 좌표계.

부체와 파랑의 상호작용에 대한 파랑의 복소포텐셜은 다음의 식으로 주어진다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \sum_{j=0}^7 \phi_j(x, y, z) e^{-i\sigma t} \quad (6.3)$$

여기서,  $\phi_0$ 는 입사파의 복소포텐셜로 다음의 식으로 주어진다.

$$\phi_0 = -\frac{igH}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh(kh)} e^{i(kx \cos \gamma + kz \sin \gamma)} \quad (6.4)$$

그리고,  $\phi_j (j = 1, 2, 3, \dots, 6)$ 는 부체운동에 관련된 발산파의 복소포텐셜, 그리고  $\phi_7$ 은 고정된 부체에 의한 입사파의 회절산란파에 관련된 복소포텐셜,  $\gamma$ 는 입사파향각을 각각 나타낸다.

따라서, 각각의 속도포텐셜은 식(6.5)의 Laplace방정식을 만족하여야 한다.

$$\nabla^2 \phi_j = 0, j = 0, 1, 2, \dots, 7 \quad (6.5)$$

해저면 및 자유수면에서 경계조건은 다음의 식들로 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial y}(x, -h, z) = 0, j = 0, 1, 2, \dots, 7 \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial y}(x, 0, z) - \frac{\sigma^2}{g} \phi_j(x, 0, z) = 0, j = 0, 1, 2, \dots, 7 \quad (6.7)$$

부소파체의 표면에서 경계조건은 다음의 식들로 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = g_1 = -i\sigma X_1^0 n_x \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = g_2 = -i\sigma X_2^0 n_y \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial n} = g_3 = -i\sigma X_3^0 n_z \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial \phi_4}{\partial n} = g_4 = -i\sigma \Theta_4^0 \{(d+y)n_z + zn_y\} \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial \phi_5}{\partial n} = g_5 = -i\sigma \Theta_5^0 \{zn_x - xn_z\} \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial \phi_6}{\partial n} = g_6 = -i\sigma\Theta_6^0 \{xn_y - (d+y)n_x\} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_7}{\partial n} = g_7 = & -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} = \frac{ig\eta^0 k}{\sigma \cosh(kh)} [n_y \sinh \{k(h+y)\}] \\ & + i(n_x \cos \gamma + n_z \sin \gamma) \cosh \{k(h+y)\} e^{i(kx \cos \gamma + kz \sin \gamma)} \end{aligned} \quad (6.14)$$

여기서,  $\mathbf{n} = i n_x + j n_y + k n_z$ 은  $S(x, y, z) = 0$ 상에서 외향단위법선벡터,  $d$ 는 부소파제의 흘수,  $\eta^0$ 는 입사파의 진폭을 각각 나타낸다.

그리고, 발산파( $j = 1, 2, \dots, 6$ ) 및 회절산란파( $j = 7$ )의 속도포텐셜은 다음의 방사조건을 만족하여야 한다.

$$\phi(r, \theta, y) - \lambda(\theta) r_1^{-1/2} \frac{\cosh \{k(y+h)\}}{\cosh(kh)} e^{ikr_1} \rightarrow 0, \quad r_1 \rightarrow \infty \quad (6.15)$$

여기서,  $r_1 = \sqrt{x^2 + z^2}$ ,  $\theta = \tan^{-1}(z/x)$ 이다.

## 6.2.2 경계적분방정식

식(6.5)~(6.15)로 정의된 경계치문제의 해는 다음의 식으로 주어지는 Green함수  $G$ 에 관하여 표현될 수 있다.

$$\phi_k(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_S f_k(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) dS \quad (6.16)$$

여기서,  $k = 1, 2, \dots, 6$ 은 6개의 운동에 대한 경우를 나타내고,  $k = 7$ 은 회절산란파에 대한 경우를 각각 나타내며,  $f_k$ 는 파원강도분포함수,  $dS$ 는 구조물표면에서 미소표면적을 나타낸다.

Green함수  $G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$ 는 다음의 식으로 주어진다(John, 1950).

$$G = \frac{2\pi(\nu^2 - k^2)}{k^2h - \nu^2h + \nu} \cosh[k(\eta + h)] \cosh[k(y + h)] [Y_0(kr) - iJ_0(kr)] \\ + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + \nu^2)}{\mu_k^2h + \nu^2h - \nu} \cos[\mu_k(y + h)] \cos[\mu_k(\eta + h)] K_0(\mu_k r) \quad (6.17)$$

여기서,  $r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2}$ ,  $\nu = \sigma^2/g$ ,  $J_0$ 는 제1종 0차 Bessel함수,  $Y_0$ 는 제2종 0차 Bessel함수,  $K_0$ 는 제2종 0차 수정Bessel함수를 각각 나타내며,  $\mu_k$ 는 다음의 분산관계식을 만족하여야 하는 정지회절산란파의 파수이다.

$$\mu_k \tan(\mu_k h) + \nu = 0 \quad (6.18)$$

식(6.16)으로 주어지는 경계치문제에 대한 해는 Green함수  $G$ 가 식(5), (6), (7), (14)를 만족하기 때문에 동일하게 구조물표면의 경계조건 이외의 모든 경계조건을 만족하게 된다. 구조물의 잠수표면상에 운동학적 경계조건식(6.8)~(6.14)을 대입하여 다음의 식을 얻는다.

$$-f_k(x, y, z) + \frac{1}{2\pi} \iint_S f_k(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G}{\partial n}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) dS = 2g_k(x, y, z) \\ , k = 1, 2, \dots, 7 \quad (6.19)$$

위의 식에서 주어진 Green함수  $G$ 로부터  $\partial G / \partial n$ 을 산정할 수 있고, 그 결과를 식(6.19)에 대입하여 부소파제의 미소면요소에 대해 이산화한 경계적분방정식을 풀면 미지수인 파원강도분포함수  $f_k (k = 1, 2, \dots, 7)$ 를 산정할 수 있게 된다. 식(6.19)를 다음과 같은 간략화된 식으로 나타낼 수 있다.

$$-f_{ki} + \alpha_{ij} f_{kj} = 2g_{ki}, \quad k = 1, 2, \dots, 7 ; \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (6.20)$$

여기서,  $N$ 은 잠수된 부소파제의 표면에 대한 미소분할면요소의 수이며,  $\alpha_{ij}$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Delta S_j} \frac{\partial G}{\partial n} (x_i, y_i, z_i; \xi, \eta, \zeta) \quad (6.21)$$

식(6.20)으로부터 다음의 식에 나타내는 바와 같이 속도포텐셜을 산정할 수 있다.

$$\phi_{ki} = \beta_{ij} f_{kj} \quad (6.22)$$

여기서,  $\beta_{ij}$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\beta_{ij} = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Delta S_j} G(x_i, y_i, z_i; \xi, \eta, \zeta) dS \quad (6.23)$$

### 6.2.3 작용력과 모멘트

부소파제의 운동요소에 따른 발산파로부터 부소파제의 잠수표면에 작용하는 유체의 동압력은 Bernoulli방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$p_k = \rho \sigma Re [i \phi_k e^{-i\sigma t}], \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.24)$$

그리고, 고정된 부소파제에 작용하는 입사파 및 회절파에 의한 유체의 동압력은 역시 Bernoulli방정식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$p_{07} = \rho \sigma Re [i (\phi_0 + \phi_7) e^{-i\sigma t}] \quad (6.25)$$

따라서, 부소파제 작용하는 힘과 모멘트는 각각 다음의 식으로 나타내어진다.

$$F_{ij}(t) = - \iint_S p_j h_i dS, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.26)$$

$$F_i(t) = - \iint_S p_{07} h_i dS, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.27)$$

여기서,  $F_i$ 는  $i$ -번째 작용력 혹은 모멘트성분,  $F_{ij}$ 는  $j$ -번째의 운동성분에 의해 발생하는  $i$ -번째의 작용력 혹은 모멘트성분이다. 그리고,  $h_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} h_1 &= n_x, \quad h_2 = n_y, \quad h_3 = n_z, \quad h_4 = (d+y)n_z - zn_y \\ h_5 &= zn_x - xn_z, \quad h_6 = xn_y - (d+y)n_z \end{aligned}$$

작용외력계수와 모멘트계수는 각각 다음과 같은 복소계수로 표현될 수 있다.

$$\begin{cases} C_j = \frac{F_j(max)}{\rho g a^3 \eta^0} e^{i\delta_j}, \quad j = 1, 2, 3 \\ C_j = \frac{F_j(max)}{\rho g a^4 \eta^0} e^{i\delta_j}, \quad j = 4, 5, 6 \end{cases} \quad (6.28)$$

여기서,  $\delta_j$ 는 입사파의 파봉에 대한 위상각을 나타내며,  $\delta_j$ 의 (+)값은 위상지연을 나타낸다.

부소과제의 운동에 의한 작용외력과 모멘트의 경우에 부가질량과 감쇠계수에 관하여 다음과 같이 나타내는 것이 일반적이다.

$$\begin{cases} -M_{ij} - iN_{ij} = \frac{F_{ij}(max)}{\rho \sigma^2 a^3 X_j^0} e^{i\delta_{ij}}, \quad i = 1, 2, 3 ; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \\ -M_{ij} - iN_{ij} = \frac{F_{ij}(max)}{\rho \sigma^2 a^4 X_j^0} e^{i\delta_{ij}}, \quad i = 4, 5, 6 ; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \end{cases} \quad (6.29)$$

여기서,  $M_{ij}$ 와  $N_{ij}$ 는 각각 부가질량과 감쇠Tensor를 나타낸다.

## 6.2.4 운동방정식

Fig. 6.1에 나타낸 부소과제에서 각 축과 회전방향의 작용력과 모멘트는 다음의 식으로 표현될 수 있다.



$$\begin{cases} F_1^T(t) = m \frac{d^2 X_1(t)}{dt^2} \\ F_2^T(t) = m \frac{d^2 X_2(t)}{dt^2} \\ F_3^T(t) = m \frac{d^2 X_3(t)}{dt^2} \end{cases} \quad (6.30a)$$

$$\begin{cases} F_4^T(t) = I_{44} \frac{d^2 \Theta_4(t)}{dt^2} - I_{45} \frac{d^2 \Theta_5(t)}{dt^2} - I_{46} \frac{d^2 \Theta_6(t)}{dt^2} \\ F_5^T(t) = I_{55} \frac{d^2 \Theta_5(t)}{dt^2} - I_{56} \frac{d^2 \Theta_6(t)}{dt^2} - I_{54} \frac{d^2 \Theta_4(t)}{dt^2} \\ F_6^T(t) = I_{66} \frac{d^2 \Theta_6(t)}{dt^2} - I_{64} \frac{d^2 \Theta_4(t)}{dt^2} - I_{65} \frac{d^2 \Theta_5(t)}{dt^2} \end{cases} \quad (6.30b)$$

여기서,  $F_i^T(t) (i = 1, 2, 3)$ 과  $F_i^T(t) (i = 4, 5, 6)$ 은 각각 부소파제 작용하는 작용력과 모멘트를 나타내며,  $m$ 은 부소파제의 질량이다.

일반적으로 다음과 같이 무차원을 수행하면 편리하다.

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_{22} = m_{33} = m/\rho a^3 \\ m_{12} &= m_{21} = m_{13} = m_{31} = m_{23} = m_{32} = 0 \\ m_{44} &= I_{44}/\rho a^5, \quad m_{55} = I_{55}/\rho a^5, \quad m_{66} = I_{66}/\rho a^5 \\ m_{45} &= m_{54} = -I_{45}/\rho a^5, \quad m_{46} = m_{64} = -I_{46}/\rho a^5, \quad m_{56} = m_{65} = -I_{56}/\rho a^5 \\ f_i^T(t) &= F_i^T(t)/\rho g a^3, \quad i = 1, 2, 3 \\ f_i^T(t) &= F_i^T(t)/\rho g a^4, \quad i = 4, 5, 6 \end{aligned}$$

위의 관계를 사용하면 식(6.30)은 다음과 같이 표현된다.

$$f_i^T(t) = \frac{m_{ij}}{g} \frac{d^2 X_j(t)}{dt^2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.31)$$

여기서,  $f_i^T(t)$ 는 계류라인의 계류장력을 포함한 총작용력계수 혹은 총작용력모멘트계수를 나타낸다.

일반적으로 작용외력은 (1)구조물의 고정시에 대한 파랑외력, (2)발산파에 의한 파랑외력, (3)복원력으로 구성된다. 따라서, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_i^T(t) = c_i(t) + \sum_{j=1}^6 [c_{ij}(t) + k_{ij}(t)] \quad (6.32)$$

여기서,  $c_i(t) = F_i(t)/\rho ga^3 (i = 1, 2, 3)$ ,  $c_i(t) = F_i(t)/\rho ga^4 (i = 4, 5, 6)$ ,  $c_{ij}$ 는 다음의 식과 같이 표현될 수 있다.

$$c_{ij}(t) = -\frac{M_{ij}}{g} \frac{d^2 X_j(t)}{dt^2} - \frac{\sigma}{g} N_{ij} \frac{dX_j(t)}{dt} \quad (6.33)$$

그리고, 무차원의  $k_{ij}(t)$ 는 정수압적 복원력과 계류장력을 나타내며, 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{ij}(t) = (K_{ij}' + K_{ij})X_j(t)/a \quad (6.34)$$

여기서,  $K_{ij}'$ 는 계류라인의 스프링상수Tensor(힘/ $\rho ga^3 (i = 1, 2, 3)$  혹은 모멘트/ $\rho ga^4 (i = 4, 5, 6)$ ),  $K_{ij}$ 는 정수압적복원력Tensor이다. 따라서, 전술한 식들을 종합하여 나타내면 다음의 운동방정식을 최종적으로 얻을 수 있을 것이다.

$$\sum_{j=1}^6 \{-\epsilon(m_{ij} + M_{ij}) - i\epsilon N_{ij} + (K_{ij}' + K_{ij})\}X_j^0/\eta^0 = |C_i|e^{i\delta_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (6.35)$$

여기서,  $\epsilon = \sigma^2 a/g$ , 복소응답진폭은  $X_j^0 = |X_j^0|e^{i\psi_j}$ 로 주어지며,  $\psi_j$ 는 위상각이다.

원점에서 입사파의 수위변동은 다음의 식으로 주어진다.

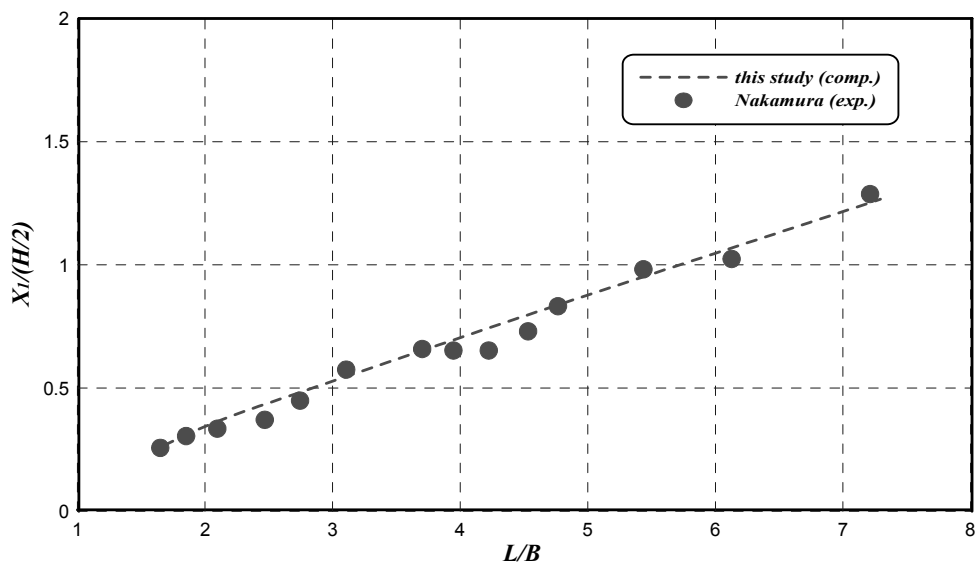
$$\eta = \eta^0 \cos(\sigma t) \quad (6.36)$$

## 6.3 해석결과

### 6.3.1 해석결과의 검증

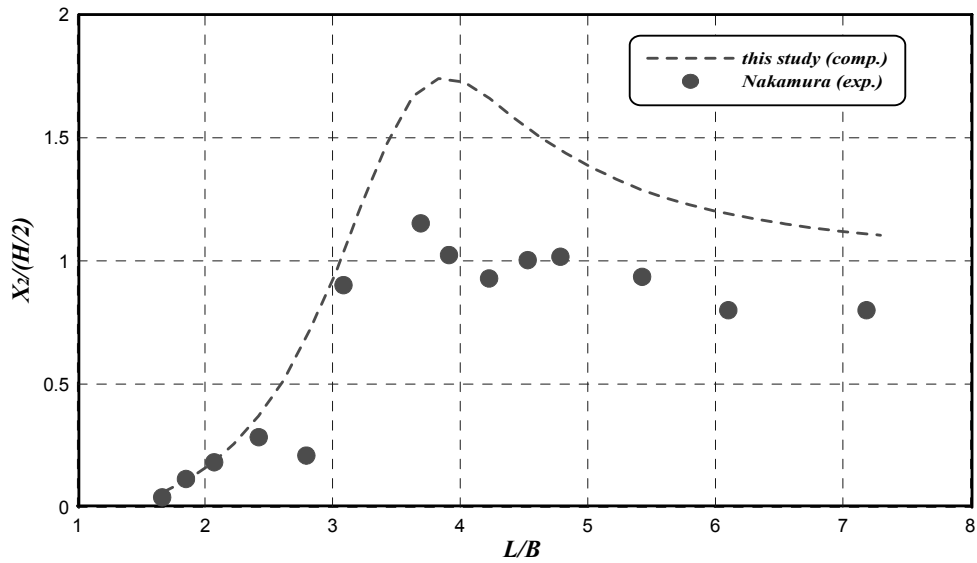
이 연구의 타당성을 검증하기 위하여 Catenary계류된 폰툰형 부소과제에 의한 운동 변위의 실험치를 제시하고 있는 中村 등(1995)의 수리실험결과와 이 연구의 3차원특이 점분포법에 의한 결과를 비교하여 나타낸 것이 Fig. 6.2에 제시되어 있다. Fig. 6.2(a), (b)의 결과를 살펴보면, Fig. 6.2(a)의 Swaying은 장주기측으로 이동할수록 증가하는 양상을 나타내며, 中村 등(1995)의 수리실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 6.2(b)의 Heaving은 고유주기를 중심으로 장단주기측으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고, 비록 수치해석결과가 실험치에 비해 공진점 부근에서 다소 높은 값을 나타내지만 공진점 부근에서 점성의 영향을 수치해석에서는 고려하고 있지 않은 점을 감안하면 전체적인 변화과정은 잘 대응되는 것으로 판단된다.

한편, 이 수치해석결과와 비교할 수 있는 충분한 양질의 기존 연구결과가 거의 없었기에 이상의 결과만으로 이 수치해석법의 타당성이 충분히 검증된다고는 볼 수 없지만, 향후 이에 대한 충분한 검토의 여지는 있는 것으로 판단된다.



(a) Swaying.

Fig. 6.2. 폰툰형 부소과제의 운동변위에 대한 3차원수리모형실험과 수치해석의 비교(계속).



(b) Heaving.

Fig. 6.2. 폰툰형 부소파제의 운동변위에 대한 3차원수리모형실험과 수치해석의 비교.

이하에서는 특이점분포법을 적용한 해석법으로부터 3차원파동장에 설치된 1基의 복합판형 부소파제를 대상으로 주기와 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포(회절계수)와 6개의 운동변위를 검토한다. 수치해석에는 실물의 크기를 상정한 복합판형 부소파제(1/20의 모형으로는 제 3장에서 언급된 바와 같이 수평판폭 5cm, 수평간격 15cm인 경우에 상당)를 적용하였으며, 부소파제의 연장과 중량은 60m, 601867.2kg이고,  $x, y, z$  축 방향의 질량관성모멘트는  $I_{44} = 484608kg \cdot m^2$ ,  $I_{55} = 1769033.6kg \cdot m^2$ ,  $I_{66} = 484406.4kg \cdot m^2$ 이다. 여기서, 복합판형 부소파제의 계류시스템에 대해서는 계류장력의 작용이 없는 자유부체를 적용하였다. 부소파제의 충돌 등과 같은 문제를 검토하는 경우에는 계류된 부소파제에 비해 자유운동의 부소파제의 경우가 다소 큰 운동을 하기 때문에 실제의 적용에서는 안전한 값을 나타낸다.

## 6.3.2 해석결과

### (1) 파랑변형

Fig. 6.3(a)~(c)는 직각입사파랑에 대해 주기를  $T=3.5, 4.5, 5.5$ sec로 변화시켜 회절계수의 공간분포를 산정한 결과이다. 결과를 살펴보면 원전어항의 유의주기에 해당하는 Fig. 6.3(a)의  $T=3.5$ sec의 경우에 부소파제 배후에서의 무차원파고분포가 0.3~0.4 정도로 항내정온도가 확보되는 것을 확인할 수 있으며, 보다 장주기인 Fig. 6.3(b)의

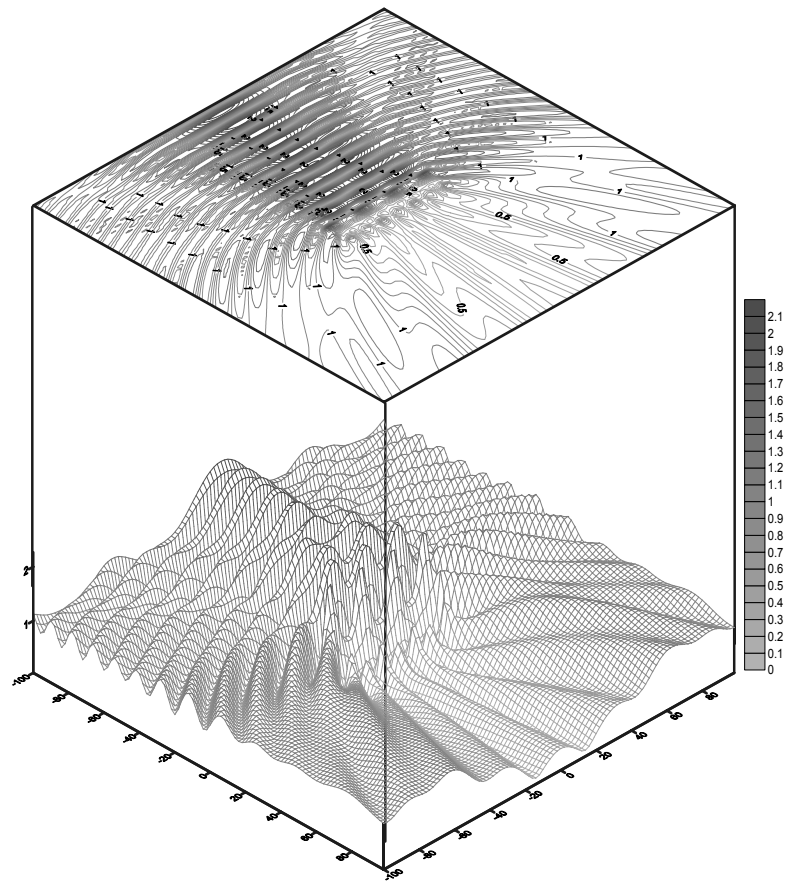
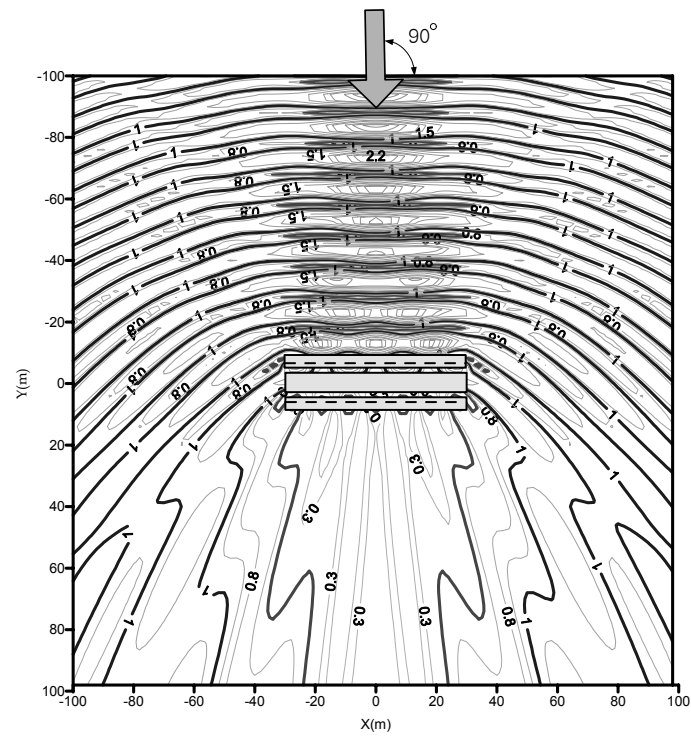
$T=4.5\text{sec}$ 의 경우가 부소파제의 배후에서 무차원파고분포가 0.1~0.3정도로 보다 향상된 정온도를 나타낸다. 이는 전술한 2차원수리모형실험에서 검토된 고유주기대에 해당되는 값으로, 부체의 큰 운동에 의해 전달율이 감소하기 때문으로 판단된다. 다음의 Fig. 6.3(c)는 비교적 장주기인  $T=5.5\text{sec}$ 의 경우에 대한 결과를 나타내며, 부소파제 배후의 무차원파고분포는 0.3~0.5정도로 장주기파랑의 제어에도 상당히 효율적이라는 것을 알 수 있다.

다음의 Fig. 6.4(a)~(c)와 Fig. 6.5(a)~(c)는 입사파향각  $\theta = 75^\circ, 60^\circ$ 인 경우에 대해 주기를  $T=3.5, 4.5, 5.5\text{sec}$ 로 변화시켜 회절계수의 공간분포를 산정한 결과이다. 입사파향이 부소파제의 좌상에서 입사하기 때문에 반사파가 우상으로 전파되어 부분중복파의 형성이 부소파제를 중심으로 우상으로 형성되어 있고, 이는 입사파향각이  $75^\circ, 60^\circ$ 로 감소할수록 더욱더 우상으로 치우치게 되는 결과를 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 제 5장의 입사파향각의 변화에 따른 무차원파고분포의 산정결과와 동일하다. 그리고, 부소파제 배후의 정온영역은 전달파에 의하여 나타므로 입사파향각과 동일한 우하측으로 나타나고, 입사파향각이 작을수록 정온한 배후역은 우하측으로 더욱더 경사지게 되고, 그 영역도 좁아진다. 따라서, 부소파제는 입사파랑에 대해 직각으로 배치하는 것이 가장 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

## (2) 동적거동

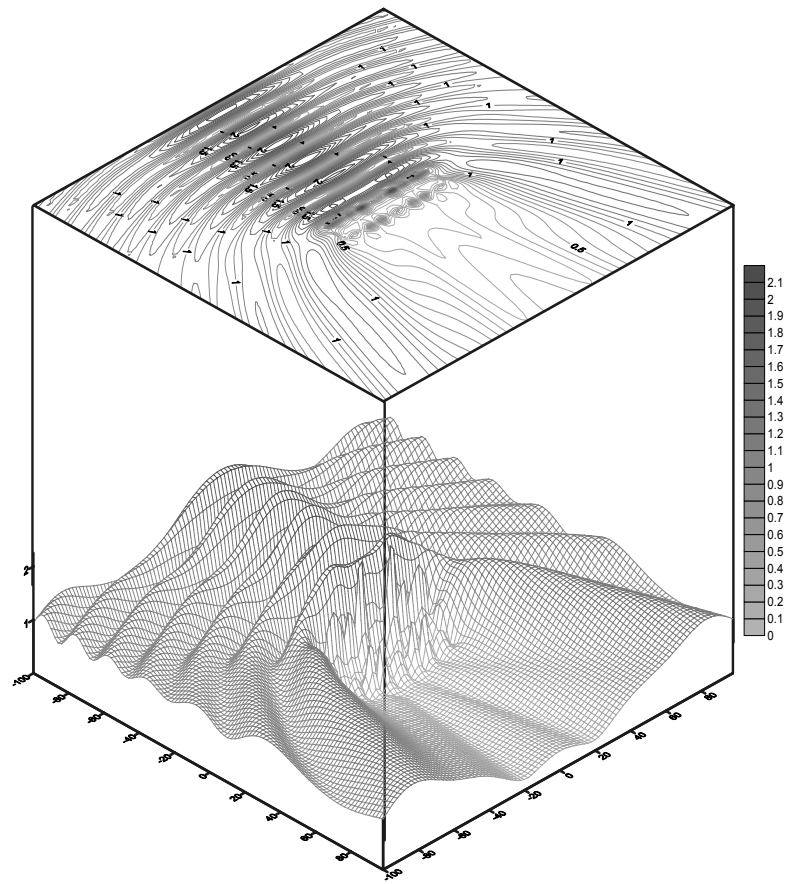
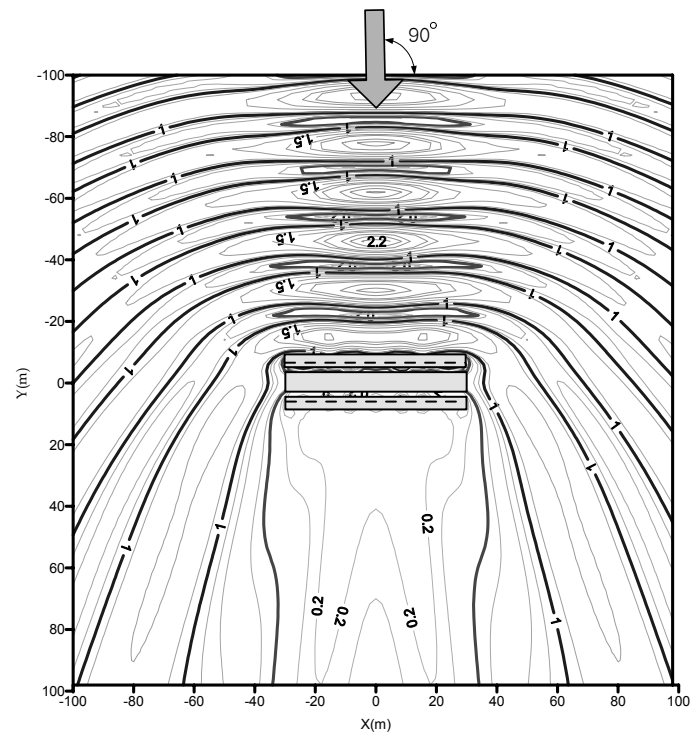
Fig. 6.6(a)~(f)는 입사파향각을 각각  $\theta = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$ 로 변화시킨 경우에 있어서 무차원주기의 변화에 따른 무차원운동량(Heaving, Swaying, Rolling, Surging, Pitching, Yawing)에 대한 수치해석결과를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, Fig. 6.6(a)~(c)의 Heaving, Swaying, Rolling의 무차원운동량은 입사파향각이 작아질수록 운동량이 감소하는 경향을 나타내며, Swaying과 Heaving은 장주기측으로 갈수록 운동량이 커지는 반면에 Rolling은 대략 고유주기 근방에서 가장 큰 운동량을 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 전술한 제 3장의 2차원해석 결과와 동일하다. 그러나, 그 값은 다소 차이를 나타내는 것을 알 수 있고, 이는 기본적으로 3차원해석에는 입사파랑의 회절의 영향으로 판단된다. Fig. 6.6(d)~(f)의 결과를 살펴보면 직각입사파의 경우에는 횡방향의 운동변위는 존재하지 않으며, 단주기에서는 Surging, Pitching 및 Yawing은 매우 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있고, 부소파제의 배치시 개구폭의 산정에 중요한 요소인 Surging은 입사파향각이 클수록 주기가 길수록 커지고, 이 장의 계산범위 내에서는  $\theta = 60^\circ$ 인 경우에 입사파고의 0.6배 정도로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 전술한 제 5장의 Catenary계류된 2기의 폰툰형 부소파제에 대한 입사파향각에 따른 무차원운동량의 수치해석결과와 비교하면 전체적으로 폰툰형 부소파제의 무

차원운동량에 비해 공진점이 장주기측으로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 그의 크기  
도 훨씬 작다는 것을 알 수 있다.



(a)  $T=3.5\text{sec}$ .

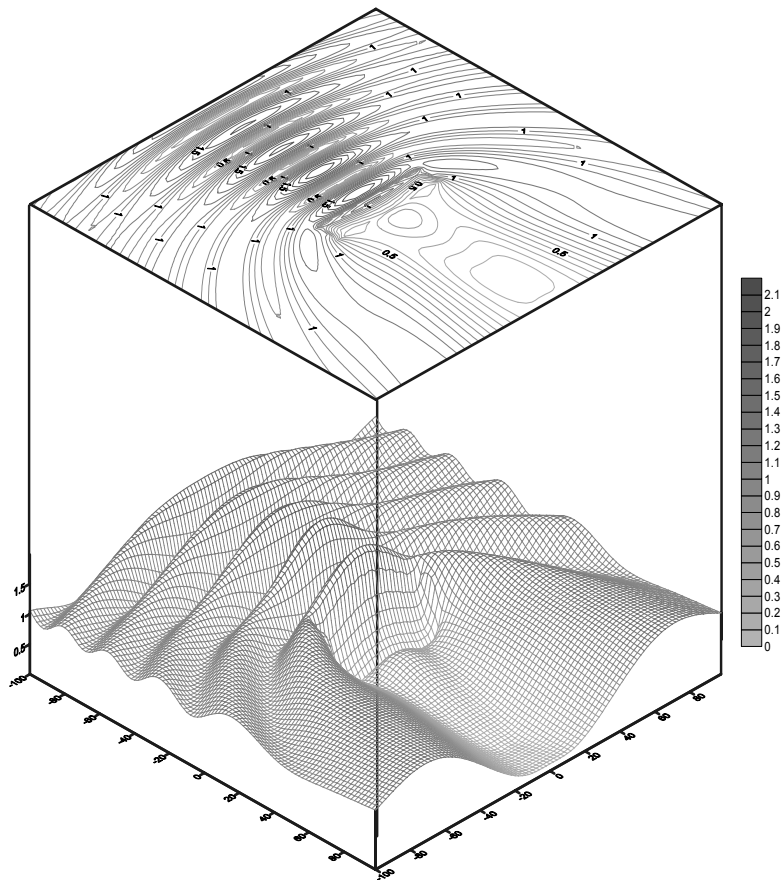
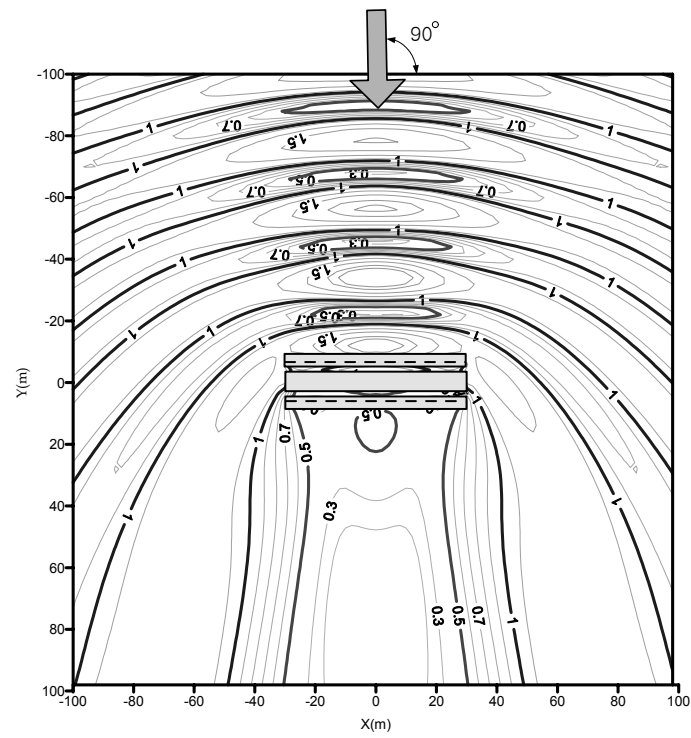
Fig. 6.3. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 90^\circ$ )(계속).



(b)  $T=4.5\text{sec.}$

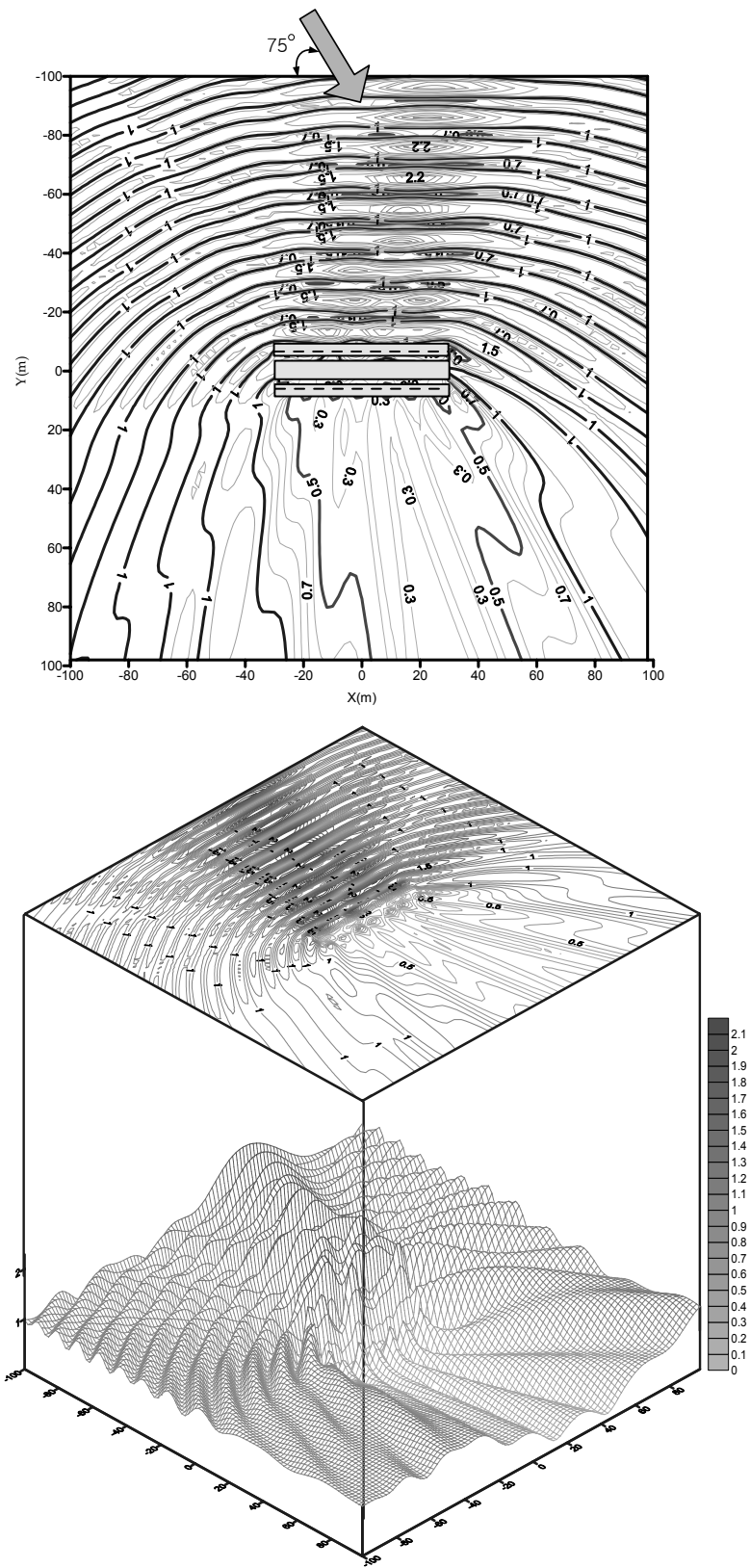
Fig. 6.3. 복합관형 부소과제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 90^\circ$ )(계속).





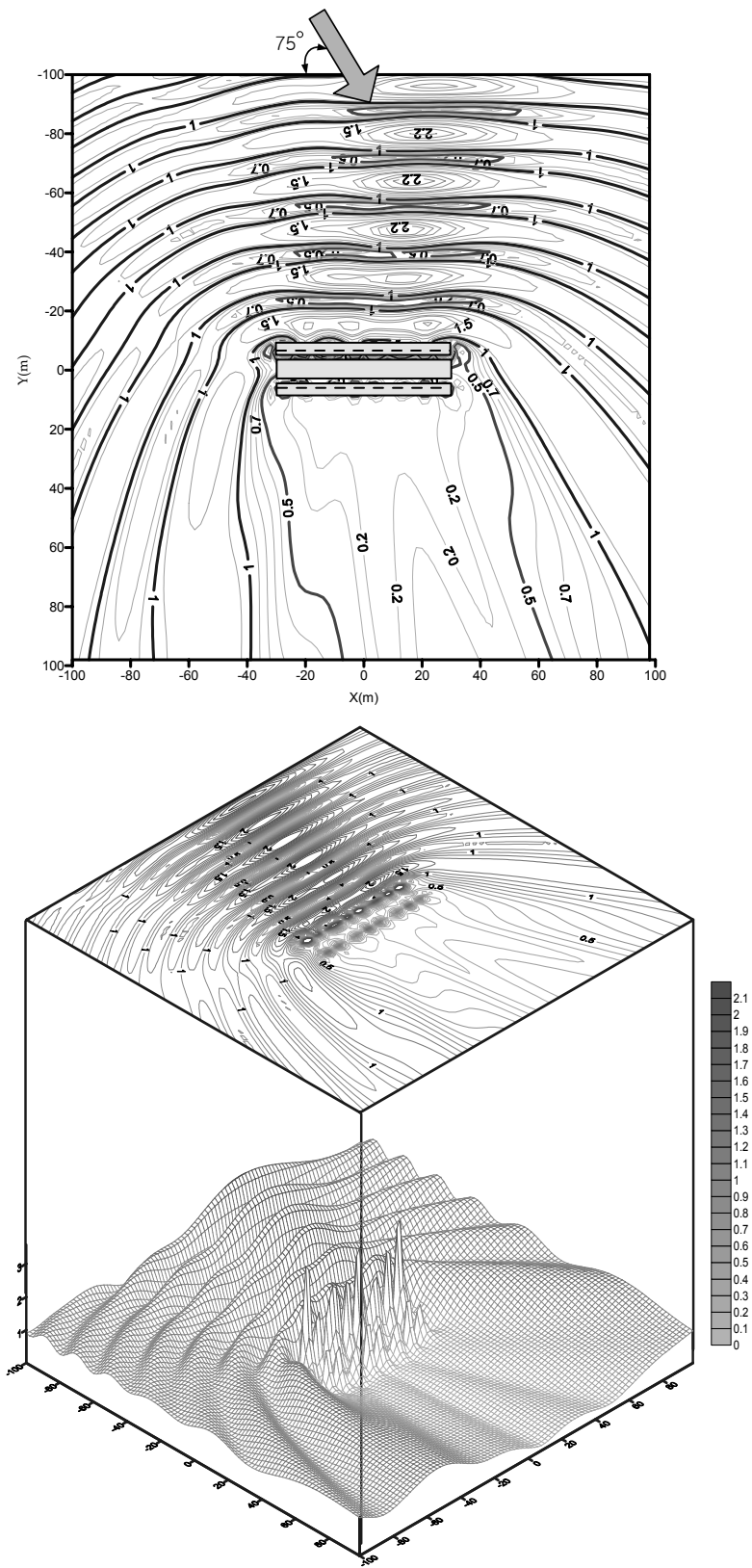
(c)  $T = 5.5 \text{ sec.}$

Fig. 6.3. 복합판형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 90^\circ$ ).



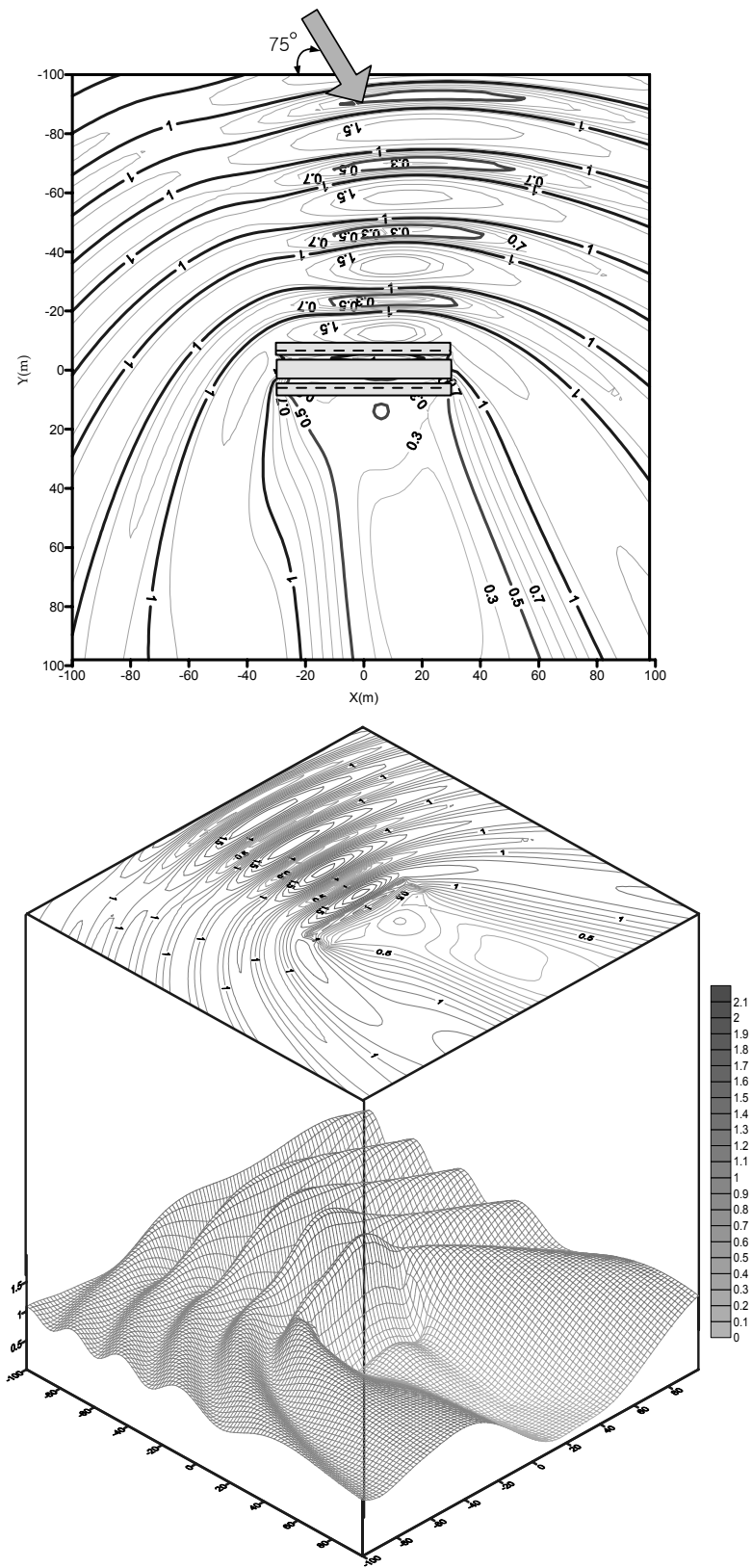
(a)  $T=3.5\text{sec.}$

Fig. 6.4. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 75^\circ$ )(계속).



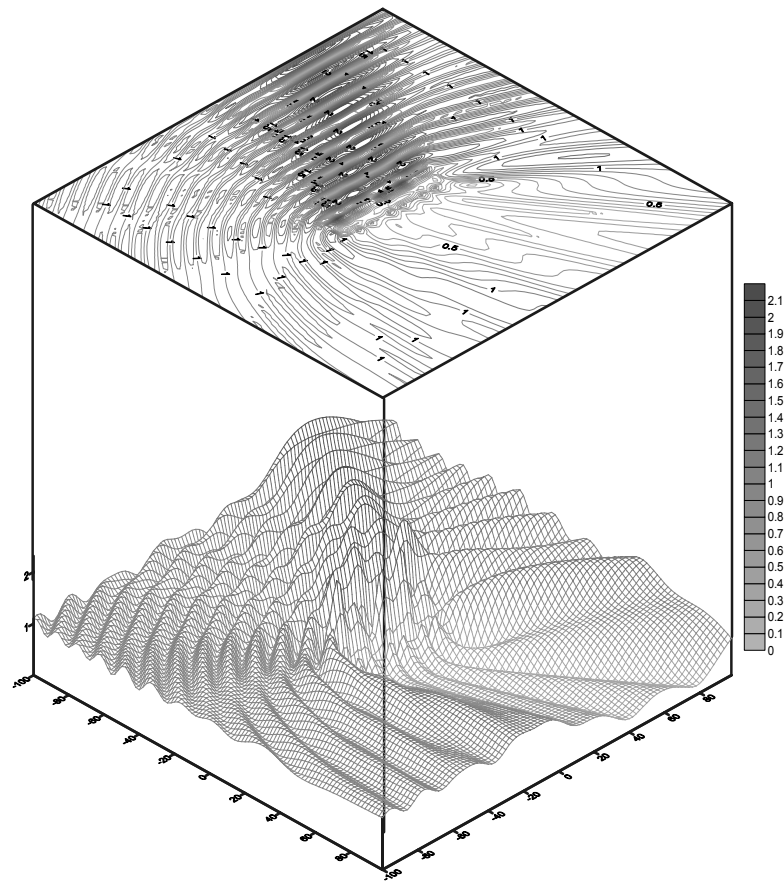
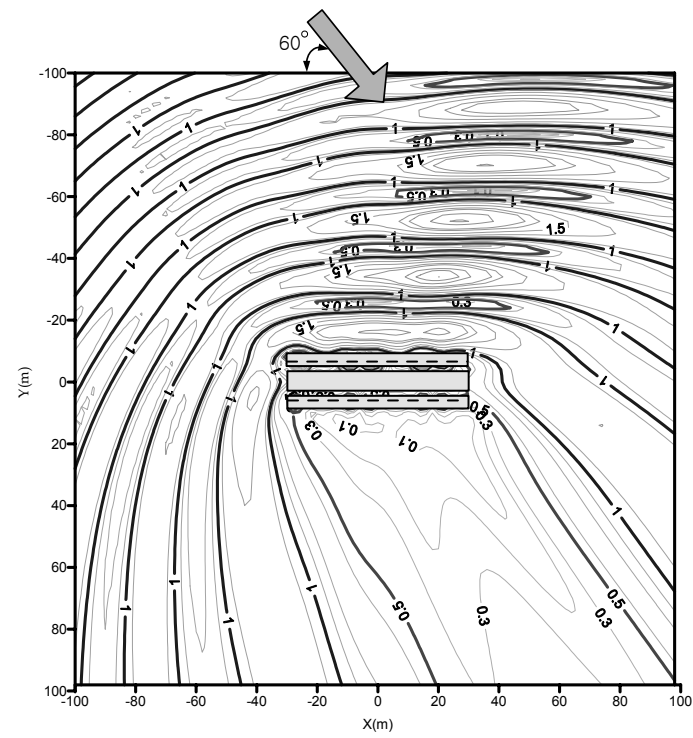
(b)  $T=4.5\text{sec.}$

Fig. 6.4. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 75^\circ$ )(계속).



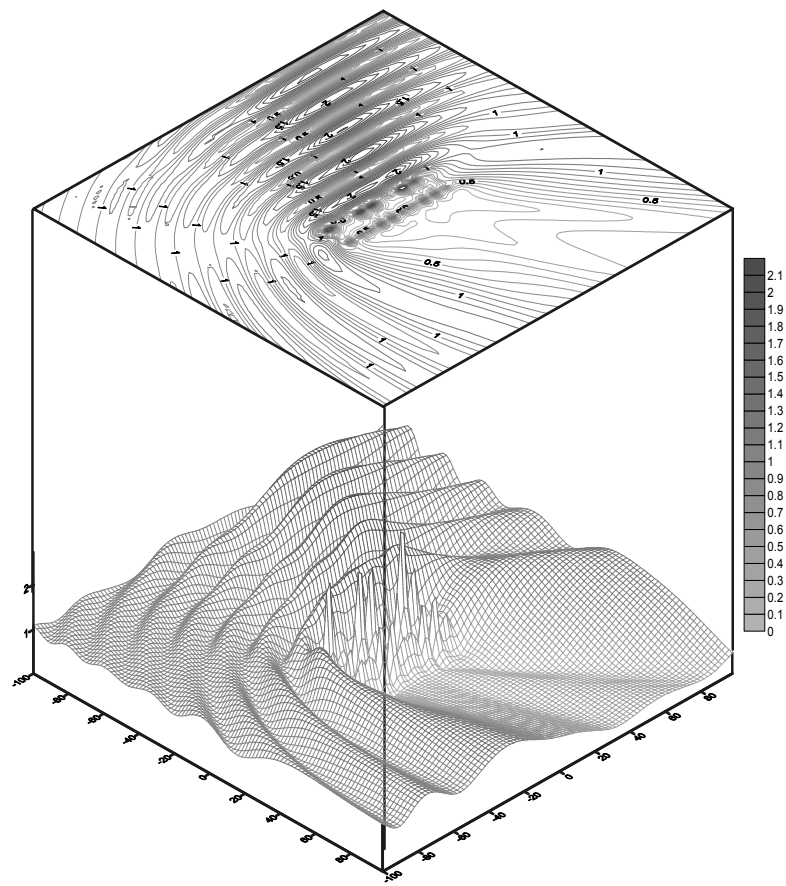
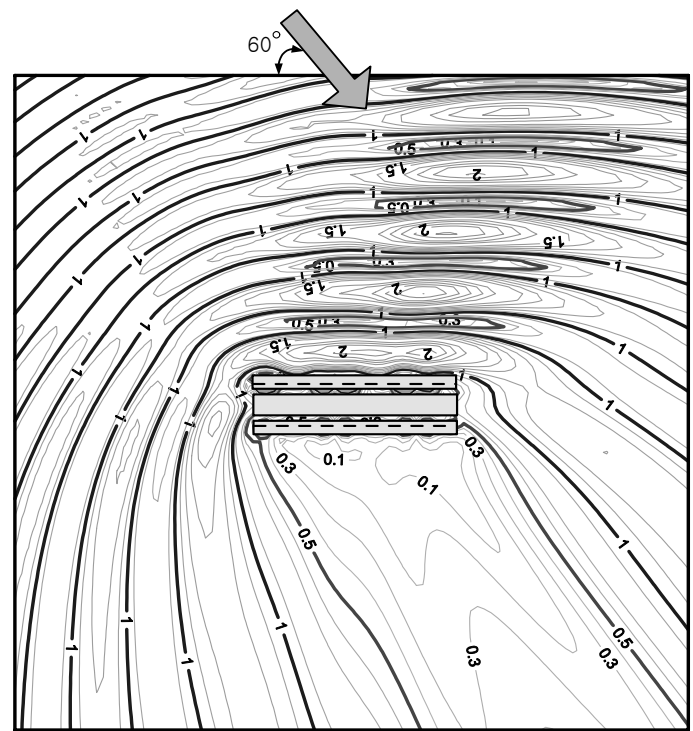
(c)  $T=5.5\text{sec.}$

Fig. 6.4. 복합판형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 75^\circ$ ).



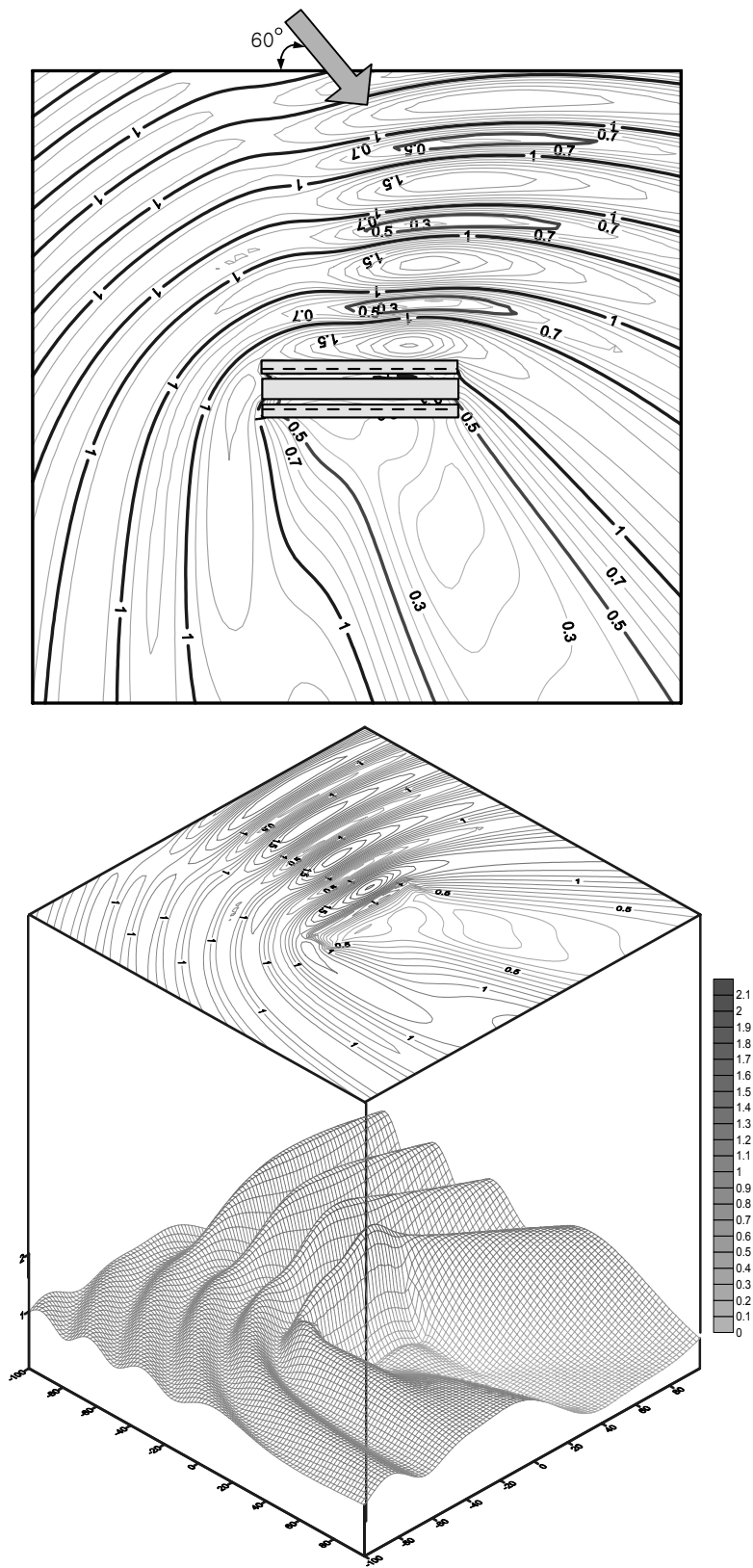
(a)  $T=3.5\text{sec.}$

Fig. 6.5. 복합관형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 60^\circ$ )(계속).



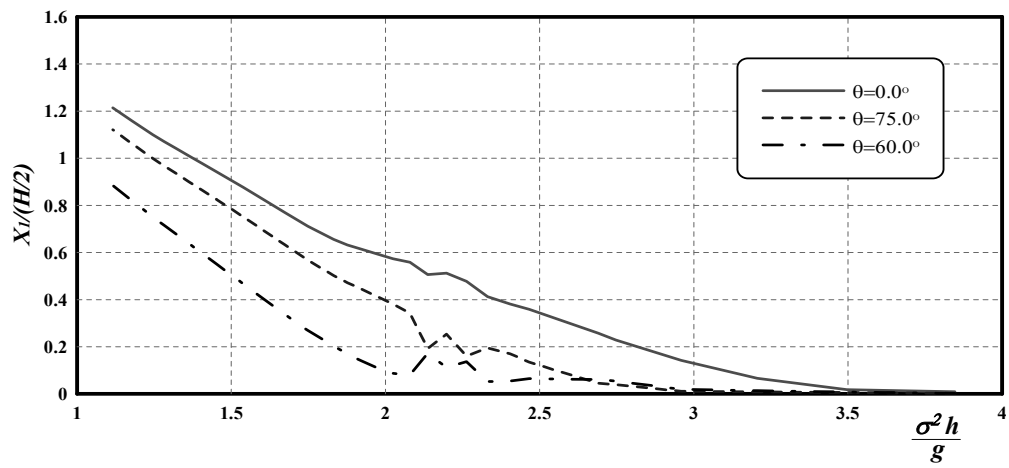
(b)  $T=4.5\text{sec.}$

Fig. 6.5. 복합관형 부소과제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 60^\circ$ )(계속).

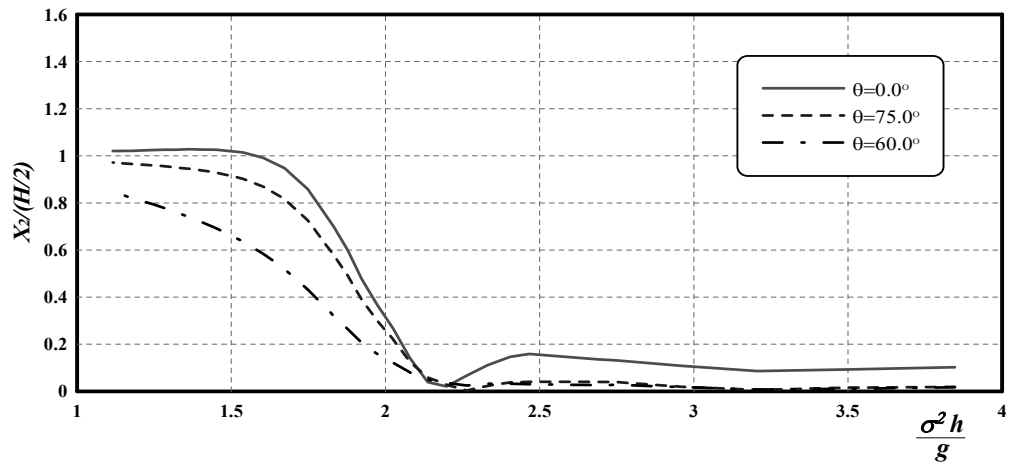


(c)  $T=5.5\text{sec.}$

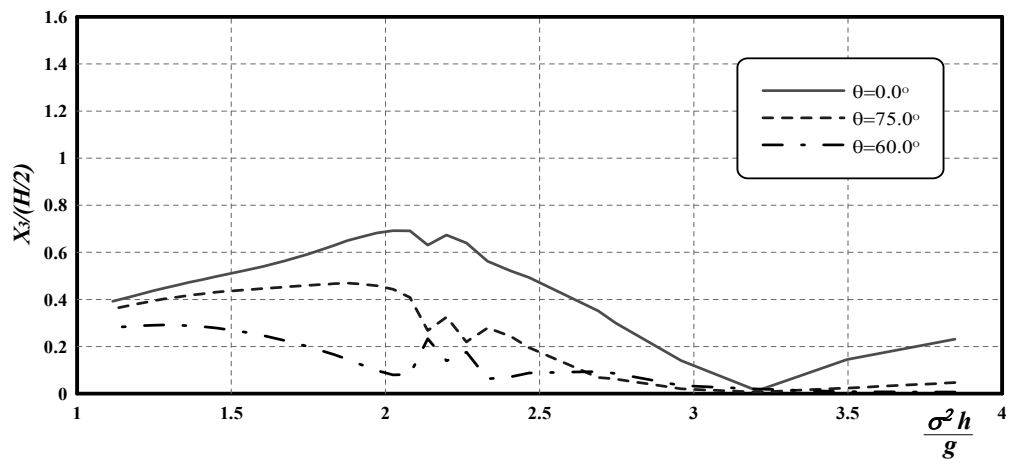
Fig. 6.5. 복합판형 부소파제에 의한 무차원파고분포( $\theta = 60^\circ$ ).



(a) Swaying.



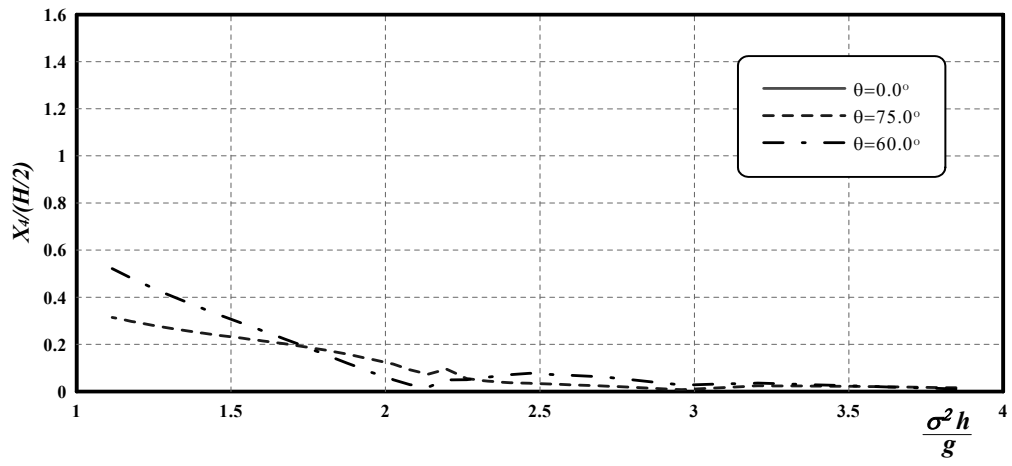
(b) Heaving.



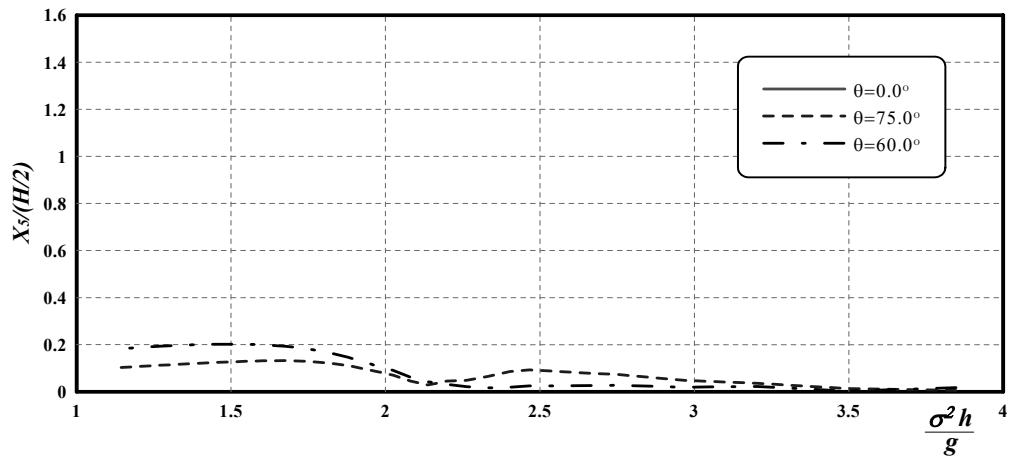
(c) Rolling.

Fig. 6.6. 입사파향각의 변화에 따른 무차원운동량의 산정결과(계속).

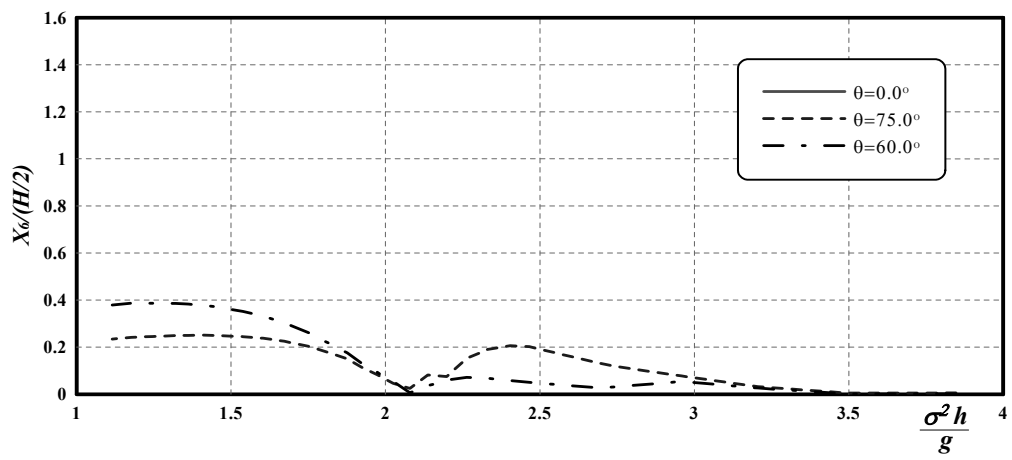




(d) Surging.



(e) Pitching.



(f) Yawing.

Fig. 6.6. 입사파향각의 변화에 따른 무차원운동량의 산정결과.

## 7. 결 론

이 연구에서는 원전어항에서 채용하고 있는 부소파제(원전 부소파제)와 치수는 다르지만 같은 형상인 본체 하부의 연직판과 본체 전후에 연직판이 부착된 부소파제(연직판각형 부소파제)와 이 연구에서 처음으로 제안하는 본체 하부의 연직판을 전후 연직판의 하부에 수평으로 부착한 부소파제(복합판형 부소파제)를 상정하여, 2차원 수치해석과 수리모형실험으로 파랑변형과 동적거동을 해석함과 동시에, 그의 특성들을 비교·검토하여, 새로운 형식의 부소파제를 제안하였다. 그리고, 평면2차원파동장의 수치해석법인 특이점분포법을 적용하여 실험역에 설치된 복합판형 부소파제, 원전 부소파제 및 연직판각형 부소파제에 의한 항내정온도를 비교·검토하였다.

또한, 육역경계가 없는 일정수심의 3차원파동장에 폰툰형 2基의 부소파제가 돌핀계류 및 Catenary계류된 경우에 파랑변형과 동적거동을 고유함수전개법과 경계요소법을 병용한 3차원수치해석으로 입사파랑의 조건과 파향 및 흘수 등의 변화에 따른 간섭 효과와 배치문제를 고찰하였다. 그러나, 3차원해석에서 고유함수전개법과 경계요소법을 병용한 해석법은 폰툰형의 부소파제에 대해서만 적용이 가능하므로 전술한 연직판각형 부소파제, 원전 부소파제 및 복합판형 부소파제 등과 같은 형상이 복잡한 부소파제의 경우에는 적용하기 어려운 한계가 있다. 따라서, 복잡한 형상의 구조물에도 적용가능한 3차원특이점분포법을 적용한 3차원해석으로부터 복합판형 부소파제에 의한 파랑변형 및 동적거동 등을 해석하며, 입사파랑조건의 변화에 따른 그의 특성들을 검토하였다. 이상의 수치해석과 수리실험결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

### 7.1 부소파제의 2차원해석

- (1) 연직 및 회전운동의 고유주기대에서 큰 운동변위가 나타난다.
- (2) 부소파제는 연직 및 회전운동의 고유주기가 장주기측으로 이동될수록 보다 장주기파랑의 제어에 효과적이다.
- (3) 원전어항의 설계파랑조건인 유의주기  $T_{1/3} = 3.5\text{sec}$ 의 영역에서는 연직판각형 부소파제와 복합판형 부소파제가 동등한 파랑제어기능을 갖지만, 연직판각형 부소파제는 유의주기  $T_{1/3} = 5.0\text{sec}$  이상의 장주기파랑에 대해서는 효과를 기대하기 어려우나, 복합판형 부소파제는 보다 장주기파랑의 제어에 효과적이다.

## 7.2 부소파제의 평면파랑변형해석

(1) 원전 부소파제와 연직판각형 부소파제 및 복합판형 부소파제를 실험해역에 적용한 경우, 부소파제 전·후면에서의 반사파와 전달파의 재현성이 좋은 것을 확인할 수 있으며, 장주기파에 대해 복합판형 부소파제의 파랑제어능력이 월등하다.

(2) 부소파제의 계획단계에서 항내정온도와 관련하여 부소파제의 최적평면배치계획에 이 수치해석법이 유용하게 활용될 수 있다.

## 7.3 부소파제의 3차원해석(1)

(1) 부소파제의 흘수가 깊을수록 반드시 파랑제어능력이 향상되는 것이 아니고, 개구부를 통한 파랑에너지의 전달이 상대적으로 커져 배후역의 정온도가 악화되는 경우도 있으므로, 흘수와 개구폭을 동시에 고려하여 판단할 필요가 있다.

(2) 주기가 길어질수록 반사파가 작아지고, 그로부터 부소파제 전면에서 형성되는 부분중복파의 형성이 작아져 부소파제의 배후해역의 파고치가 상승하고, 또한 보다 단주기 파랑일수록 배후역으로 부분중복파의 유입에 의해 개구부 배후역에서의 파고가 상승하는 결과를 볼 수 있다.

(3) 부소파제의 폭의 변화는 일반적으로 입사파랑의 파장과 깊은 관련을 가지며, 폭이 넓을수록 파랑제어능력이 탁월하다고 할 수는 없고, 무엇보다 현지파랑의 설계주기에 적합하도록 부소파제의 폭을 결정하는 것이 중요하다.

(4) 연직운동만이 허용된 돌핀계류 부소파제는 입사파의 주기가 길수록 부소파제 배후에서의 전달파가 커지지만, Catenary계류된 부소파제의 경우에는 Rolling의 공진점에서 전달파가 감소한다.

(5) 2基의 부소파제에 대해 파가 경사입사하는 경우에 단주기측에서 횡방향의 수평변위와 회전변위가 부소파제 사이의 간섭에 의해 상이하게 발생하며, 장주기측으로 이동할수록 간섭의 효과는 작아진다.

## 7.4 부소파제의 3차원해석(2)

(1) 특이점분포법을 적용한 3차원 해석법으로부터 1基의 계류되지 않은 자유 복합판형 부소파제에 대한 파랑변형을 검토한 결과 2차원수리모형실험에서 검토된 복합판형 부소파제의 고유주기대인  $T=4.5\text{sec}$ (현지환산량)에서 전달율이 가장 낮게 나타난다.

(2) 파랑이 경사입사하는 경우에 대한 운동변위의 산정결과, Surging이 나타나며, 이는 주기가 길수록 입사파향각이 클수록 그의 진폭이 크게 된다. 따라서, 복합판형 부소파제의 실효역으로 배치검토에서 이 연구결과가 주요한 기초자료로 제공될 수 있다.

## 참고문헌

---

- [1] 김도삼, 이광호, 최낙훈, 윤희면 (2004) : 신형식부방파제의 파랑제어에 관한 연구, 한국해안·해양공학회지, 16(1), pp. 1-9.
- [2] 김도삼, 이재석, 이봉재 (2001) : 수면부근에 설치된 이열고정부방파제에 의한 파랑제어의 해석, 한국해양공학회지, 15(4), pp. 1-7.
- [3] 김도삼, 윤덕영, 허동수, 함계윤 (1997) : 약비선형모델에 의한 투과성잠제와 Stokes 2차파와의 비선형간섭에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 17(II-5), pp. 477-492.
- [4] 김도삼, 윤희면 (2002) : 말뚝계류된 부방파제의 공간파랑제어 및 동적거동에 관한 연구, 한국해안·해양공학회지, 14(3), pp. 183-191.
- [5] 김도삼, 최낙훈, 윤희면, 손병규 (2004) : Catenary계류된 부방파제의 3차원 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회 학술대회논문집, pp. 241-248.
- [6] 곽문수, 이기상, 편종근 (2003) : 투과사석방파제 주변의 파랑장 해석, 한국해안·해양공학회지, 15(2), pp. 116-126.
- [7] 마산지방해양수산청 (2002) : 원전항건설공사 부방파제실험보고서.
- [8] 이봉재 (2003) : 임의단면 형상을 갖는 복수 대형 연직 주상구조물의 파랑변형과 파력에 관한 연구, 한국해양대학교 박사학위논문.
- [9] 해양수산부 (2002) : 해양수산백서.
- [10] 포스코건설 (2003) : 부소파제의 파랑제어 해석법과 기술개발사례 및 설치현장조사.
- [11] Isaacson, M. Q. (1978) : Vertical cylinder of arbitrary section in waves, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Div., ASCE, 104(4), pp. 309-322.

- [12] John, F. (1950) : On the motions of floating bodies II, Comm. Pure Appl. Math., Vol. 3, pp. 45-101.
- [13] Lynett, P.J.-F., Liu, P.L.-F., Losada, I.J., and Vidal, C. (2000) : Solitary wave interaction with porous breakwater. J. of Waterway, Coastal and Port, Ocean Eng. Div., ASCE, 126(6), pp. 314-322.
- [14] McIver, P. (1999) : Water wave diffraction by thin porous breakwaters, J. of Waterway, Coastal and Port, Ocean Eng. Div., ASCE, 125(2), pp. 66-70.
- [15] Sollitt, C.K. and Cross, R.H. (1972) : Wave transmission through permeable breakwater, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, Vol. III, pp. 1827-1846.
- [16] Yu, X. (1995) : Diffraction of water waves by porous breakwaters, J. of Waterway, Coastal and Port, Ocean Eng. Div., ASCE, 121(6), pp. 275-282.
- [17] Yu, X. and Togashi, H. (1996) : Combined diffraction and transmission of water waves around a porous breakwater gap, Proc., 25th Int. Conf. Coast. Eng., ASCE, New York, pp. 2063-2076.
- [18] 井島武士, 周宗仁, 湯村やす, 田淵幹修 (1973) : 任意形状の透過および不透過防波堤による波の散乱と波力, 海岸工学講演會論文集, 20, pp. 79-87.
- [19] 高木又男, 新井信一, 桐野佳子 (1974) : 係留浮体の規則波中の運動に関する理論計算, 日本造船學會論文集, 135, pp. 95-107.
- [20] 井島武士, 吉田明德, 湯村やす (1975) : 有限水深域の波にする橢圓および矩形浮體の運動と波の變形, 土木學會論文報告集, 244, pp. 91-105.
- [21] 酒井哲郎, 佐藤孝夫, 岩垣雄一 (1978) : 任意反射率・任意透過率の防波堤による平面的な波浪變形の数値計算, 海岸工学講演會論文集, 20, pp. 98-102.
- [22] 上田, 白石 (1981) : カテナリ一理論による最適繫留鎖の選定法および計算圖表, 港灣技術研究所技術資料, 379, pp. 55-65.

- [23] 岩田好一郎・清野 博 (1982) : 3点法の水位記録す用にた不規則波の入・反射波の分離推定法, 第38回土木學會年次講演會概要集, pp. 343-344.
- [24] 日本海事協會 (1983) : 係留システム設計指針, pp. 201-217.
- [25] 中村孝幸, 野村周吾 (1990) : 規則配列された3次元物體もわりの波浪境界値問題の解釋法, 海岸工學論文集, 37, pp. 524-528.
- [26] 日本土木學會 海岸工學委員會 (1993) : 波・構造物・地盤の調査・設計手法 調査・研究報告書, p. 58.
- [27] 鈴木康正, 森川高德, 迂安治, 氷末英之, 平右哲也 (1994) : 環境保全型防波堤周邊の波浪變形計算, 海岸工學論文集, 41, pp. 991-995.
- [28] 沿岸開發技術研究センター (1994) : 新形式防波堤技術マニュアル.
- [29] 中村孝幸, 大森禎敏, 井手善彦 (1995) : チェー浮ソ係留された防波堤列による波浪制御効果について, 海岸工學論文集, 42, pp. 956-960.
- [30] 中村孝幸, 大森禎敏, 井手善彦 (1996) : 浮防波堤の動搖特性に及ぼす波漂流力と減衰力の効果について, 海洋開發論文集土木學會, 12, pp. 189-194.
- [31] 中村孝幸, 井出善彦 (1997) : 減衰波中における浮体の動搖理論とその適用性に關する研究, 海岸工學論文集, 44, pp. 856-860.
- [32] 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚 孝 (1999) : 渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について, 海岸工學論文集, 46, pp. 796-800.
- [33] 中村孝幸, 水谷法美, 許東秀, 金度三 (2002a) : 浮防波堤の平面配置法と波浪制御効果に關する研究, 日本海洋開發論文集, 18, pp. 299-304.
- [34] 中村孝幸, 水谷法美, 許東秀, 金度三 (2002b) : 港灣域における浮防波堤の平面配置問題に對する近似解法について, 日本海岸工學論文集, 49, pp. 681-685.

- [35] 中村孝幸, 高山伸雄, 中山哲巖, 河野 徹 (2002) : ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過構造物の海水交換形防波堤の開発, 日本海岸工学論文集, 49, pp. 661-665.



## 부 록

### A1. 2차원Catenary계류에 의한 반력의 산정법

#### A1.1 해석모델 및 좌표계

해석모델 및 좌표계를 Fig. A1에 나타낸다. 즉 일정수심  $h$ 의 유체장에 단면2차원부체가 부체의 임의점으로부터 해저의 앵커점까지 펼쳐있는 완전가요성을 갖는 라인에 의해 계류되어 있는 경우를 고려한다. 여기서 좌표계는 해저의 앵커점을 원점으로 하는  $(\bar{x}, \bar{z})$ 좌표계이다.

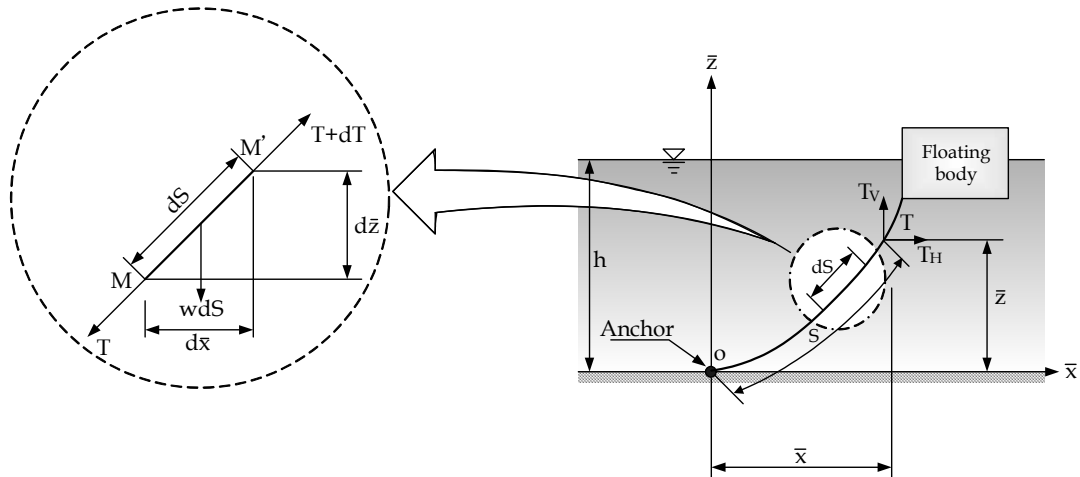


Fig. A1. 계류라인의 해석모델과 좌표계.

#### A1.2 Catenary이론에 의한 산정법

Catenary이론(日本海事協會, 1983)에 의하면 계류라인에 힘이 작용하여 정적평형상태시의 힘의 평형방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$T_H = \frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{z}^2} + w \left[ 1 + \left( \frac{d\bar{x}}{d\bar{z}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (\text{A1.1})$$

여기서,  $T_H$ 는 계류라인의 초기 수평장력,  $w$ 는 계류라인의 수중단위중량이다.

식(A1.1)로부터 Catenary라인의 형상을 나타내는 연직거리  $\bar{z}$ 와 계류점으로부터의 길이  $S$ 가 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{z} = a \left[ \cosh \left( \frac{\bar{x}}{a} \right) - 1 \right] \quad (\text{A1.2})$$

$$S = a \sinh \left( \frac{\bar{x}}{a} \right) \quad (\text{A1.3})$$

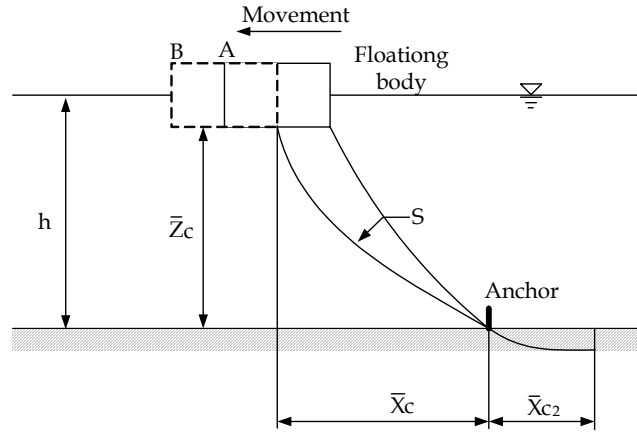
여기서,  $a$ 는 다음식과 같이 나타난다.

$$a = \frac{T_H}{w} \quad (\text{A1.4})$$

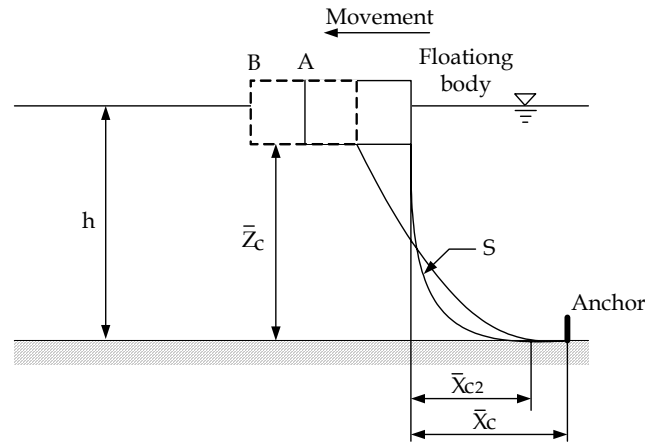
또한, 계류라인의 연직장력  $T_V$ 는 라인의 연직하향의 길이를 고려하여 구해진다. 계류라인에 의한 계류점에서의 수평반력은 라인길이와 그 수평 및 연직투영길이 등을 입력값으로 하여 식(A1.2)의 초월방정식을 Newton법 등에 의해 근사적으로 해석함으로써 추정될 수 있다.

### A1.3 선형스프링상수의 산정법

부체측의 계류점이 크게 이동하여 Catenary라인의 형상이 직선에 가까운 형태로 되면 강한 비선형성의 반력특성을 나타내지만, 부체계류점의 이동이 비교적 작은 경우에는 계류라인을 등가선형스프링으로 근사하여 취급할 수 있다. 그리고, 계류라인은 부체의 이동방향에 따라 Fig. A2와 같은 2개의 상태로 된다. Fig. A2(a)와 같이 부체측의 계류점이 A점에서 B점으로 이동한 경우는 라인과 해저가 접하는 부분이 없게 되고, Fig. A2(b)와 같이 이동하면 라인과 해저가 접하는 부분이 형성된다. 여기서는 계류라인 1줄의 선형스프링상수를 라인과 해저가 접하는 부분의 유무로 나누어 산정하며, 각각에 대한 선형스프링상수의 값은 다음의 식으로 주어진다(日本海事協會, 1983).



(a) 계류라인과 해저가 접하는 부분이 없는 경우.



(b) 계류라인과 해저가 접하는 부분이 있는 경우.

Fig. A2. 부체의 운동에 따른 계류라인의 조건.

(a) 라인과 해저가 접하는 부분이 없는 경우

$$\begin{cases} K_{HH} = w \sinh D / Q_t \\ K_{HV} = w \{ (\cosh D - 1) \cosh U + \sinh D \sinh U \} / Q_t \\ K_{VV} = w \{ D \cosh U \cosh (U + D) - \sinh D \} / Q_t \end{cases} \quad (A1.5)$$

여기서,  $K_{HH}$ 는 수평방향의 이동에 의한 수평방향으로의 스프링복원력계수,  $K_{VV}$ 는 연직방향의 이동에 의한 연직방향으로의 스프링복원력계수,  $K_{HV}$ ,  $K_{VH}$ 는 연직(수평) 방향의 이동에 의한 수평(연직)방향으로의 스프링복원력계수이다.

또한,  $Q_t = D \sinh D - 2 (\cosh D - 1)$  이고,  $D$ 와  $U$ 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\begin{cases} D = w \frac{\bar{x}_C}{T_H} \\ U = w \frac{\bar{x}_{C2}}{T_H} \end{cases} \quad (\text{A1.6})$$

여기서,  $\bar{x}_c$ 와  $\bar{x}_{c2}$ 는 Fig. A2(a)에 정의되어 있다.

**(b) 계류라인이 해저와 접하는 부분이 있는 경우**

$$\begin{cases} K_{HH} = w \sinh D / Q_s \\ K_{HV} = w (\cosh D - 1) / Q_s \\ K_{VV} = w (D \cosh D - \sinh D) / Q_s \end{cases} \quad (\text{A1.7})$$

여기서,  $Q_s = D \sinh D - 2 (\cosh D - 1)$ ,  $D$ 는 다음의 식으로 정의된다.

$$D = w \frac{\bar{x}_{C2}}{T_H} \quad (\text{A1.8})$$

또한,  $\bar{x}_{c2}$ 는 Fig. A2(b)에 정의되어 있다.

따라서, 부소파제가 정적평형상태에 있는 경우 계류라인의 저항력  $K_{ij}(i, j = x, z, \theta)$ 는 다음의 식으로 산정될 수 있다.

$$\begin{cases} K_{xx} = K_{HH} \\ K_{xz} = K_{HV} \\ K_{x\theta} = K_{HH} (\bar{z}_E - z_G) - K_{HV} (\bar{x}_E - x_G) \end{cases} \quad (\text{A1.9})$$

$$\begin{cases} K_{zx} = K_{xz} \\ K_{zz} = K_{VV} \\ K_{z\theta} = K_{HV}(\bar{z}_E - z_G) - K_{VV}(\bar{x}_E - x_G) \end{cases} \quad (\text{A1.10})$$

$$\begin{cases} K_{\theta x} = K_{x\theta} \\ K_{\theta z} = K_{z\theta} \\ K_{\theta\theta} = K_{HH}(z_E - z_G)^2 - K_{HV}(z_E - z_G)(x_E - x_G) + K_{VV}(x_E - x_G)^2 \end{cases} \quad (\text{A1.11})$$

여기서,  $(x_G, z_G)$ 는 부체중심의 좌표,  $(x_E, z_E)$ 는 부체계류점의 좌표이다.

## A2. 3차원Catenary계류에 의한 반력의 산정법

### A2.1 계류라인의 반력산정

Fig. A3과 같이 부체중심에 고정된  $G-x'_0, y'_0, z'_0$ 좌표계로부터 계류라인 No.n에 있어서 부체계류점의 좌표를  $(x'_n, y'_n, z'_n)$ , 정지위치에서부터 착쇄점의 변위를  $(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$ 으로 하면,  $(x_G, y_G, z_G, \varphi, \theta, \psi)$ 과 착쇄점변위와의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{pmatrix} \Delta x_n \\ \Delta y_n \\ \Delta z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\psi & \theta \\ \psi & 0 & -\varphi \\ -\theta & \varphi & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_n \\ y'_n \\ z'_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} \quad (\text{A2.1})$$

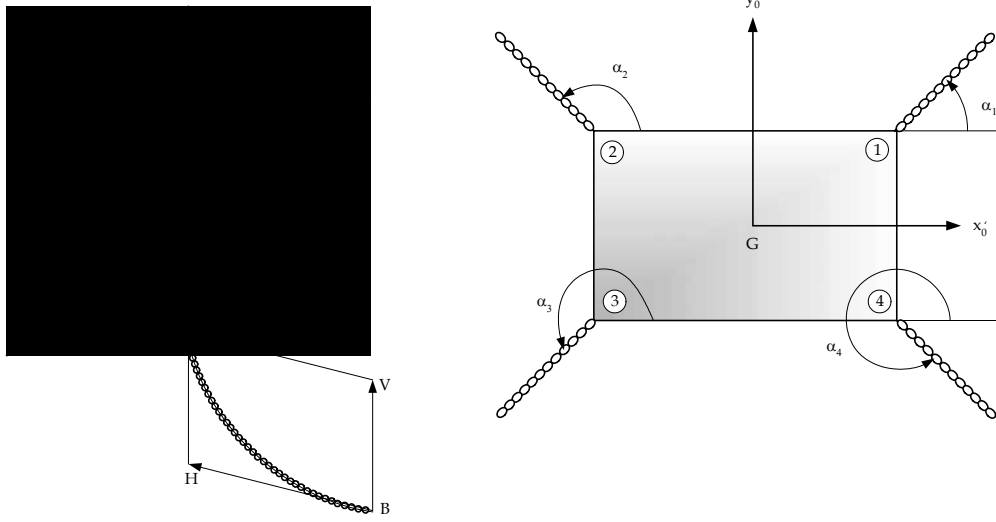


Fig. A3. 계류라인의 좌표계.

여기서,  $x_G$ 는 Surging,  $y_G$ 는 Swaying,  $z_G$ 는 Heaving,  $\varphi$ 는 Rolling,  $\theta$ 는 Pitching,  $\psi$ 는 Yawing을 각각 나타낸다.

또한, BHV평면내의 계류점변위  $(\Delta H_n, \Delta V_n)$ 와의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{cases} \Delta H_n = -(\Delta x_n \cos \alpha_n + \Delta y_n \sin \alpha_n) \\ \Delta V_n = \Delta z_n \end{cases} \quad (\text{A2.2})$$

한편, 변위  $\Delta H_n, \Delta V_n$ 에 의한  $H$ 축과  $V$ 축방향으로 계류라인 반력의 증분을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{cases} P_H^{(n)} = f_H(\Delta H_n, \Delta V_n) \\ P_V^{(n)} = f_V(\Delta H_n, \Delta V_n) \end{cases} \quad (\text{A2.3})$$

따라서, Fig. A4에 나타내는 공간고정좌표  $G - x', y', z'$ 좌표방향의 반력을 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} P_x^{(n)} = -P_H^{(n)} \cos \alpha_n \\ P_y^{(n)} = -P_H^{(n)} \sin \alpha_n \\ P_z^{(n)} = -P_V^{(n)} \end{cases} \quad (\text{A2.4})$$

이로부터,  $n_0$ 분의 계류라인을 부체에 부착한 경우에 부체의 운동방향으로 작용하는 계류라인의 반력 및 중심주변의 반력모멘트를 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} G_x = -\sum_{n=1}^{n_0} P_x^{(n)} \\ G_y = -\sum_{n=1}^{n_0} P_y^{(n)} \\ G_z = -\sum_{n=1}^{n_0} P_z^{(n)} \\ G_\varphi = -\sum_{n=1}^{n_0} \mathbf{G}^{(n)} \cdot \mathbf{i}_x \\ G_\theta = -\sum_{n=1}^{n_0} \mathbf{G}^{(n)} \cdot \mathbf{i}_y \\ G_\psi = -\sum_{n=1}^{n_0} \mathbf{G}^{(n)} \cdot \mathbf{i}_z \end{cases} \quad (\text{A2.5})$$

여기서,

$$\mathbf{G}^{(n)} = \mathbf{r}^{(n)} \times \mathbf{P}^{(n)} = \begin{vmatrix} \mathbf{i}_x & \mathbf{i}_y & \mathbf{i}_z \\ r_x^{(n)} & r_y^{(n)} & r_z^{(n)} \\ P_x^{(n)} & P_y^{(n)} & P_z^{(n)} \end{vmatrix} \quad (\text{A2.6})$$

$$\begin{pmatrix} r_x^{(n)} \\ r_y^{(n)} \\ r_z^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\psi & \theta \\ \psi & 1 & -\varphi \\ -\theta & \varphi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n' \\ y_n' \\ z_n' \end{pmatrix} \quad (\text{A2.7})$$

그리고,  $i_m$ 은  $m$ 방향의 단위벡터,  $r^{(n)}$ 은 부체중심으로부터 계류라인 No.n의 부체계류점까지의 위치벡터이다.

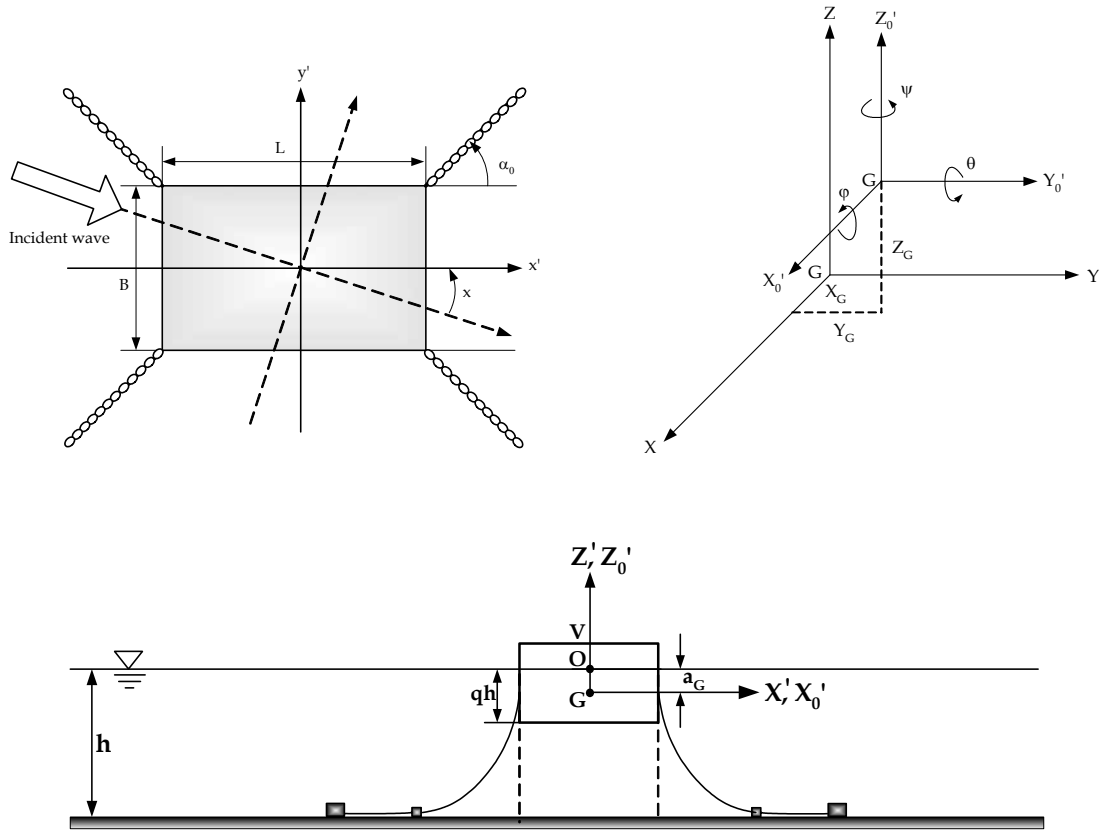


Fig. A4. 계류라인의 공간고정좌표.

## A2.2 계류라인에 있어서 비선형반력의 계산방법

부체상의 계류점(A점)과 해저부앵커점(B점) 사이에 연결된 계류라인은 선밀도가 균 일한 것으로 하면 Catenary곡선을 이루게 된다. 이 특성을 이용하면 반력을 이하와 같 이 계산할 수 있다. 초기설정시에 있어서 이 두점간의 수평방향거리를  $H_0$ , 연직방향거 리를  $V_0$ , 부체계류점에서 장력의 수평방향성분을  $T_{H0}$ , 단위길이당의 중량을  $\omega$ 로 하 여 이들의 값이 주어졌다고 가정한다. 먼저, 계류라인과 해저가 접하는 부분이 없는 경 우(Fig. A5) 또는 계류라인과 해저가 접하는 부분이 있는 경우(Fig. A6)를 판별하여 계



류라인의 실제길이  $s_0$ 와 유효길이  $l_0$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

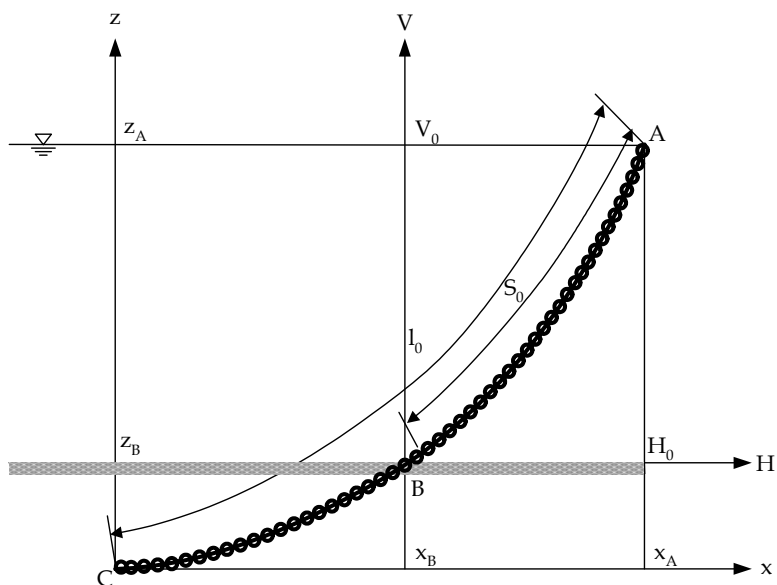


Fig. A5. 계류라인이 해저와 접하는 부분이 없는 경우.

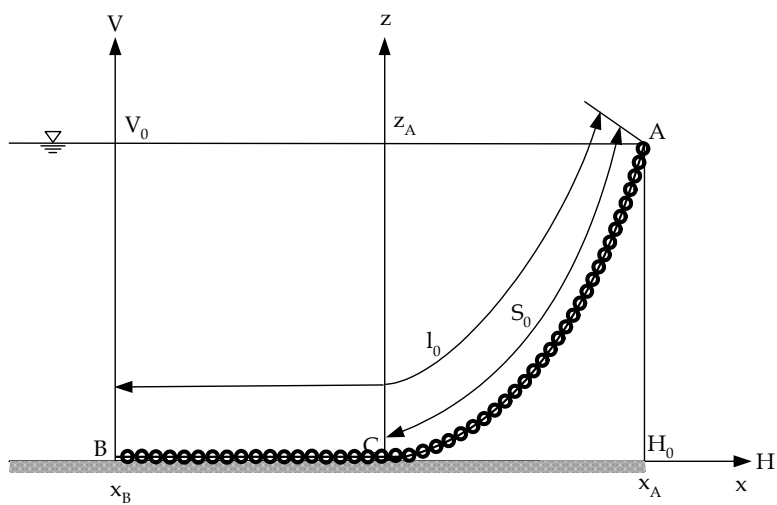


Fig. A6. 계류라인이 해저와 접하는 부분이 있는 경우.

따라서,  $V_0, a_0 (= T_{H0}/\omega)$ 로부터 다음의 관계가 주어진다.

$$\begin{cases} s_i = \sqrt{V_0(V_0 + 2a_0)} \\ x_i = a_0 \sinh^{-1} \left( \frac{s_i}{a_0} \right) \end{cases} \quad (\text{A2.8})$$

여기서,  $x_i > H_0$ 이면 Fig. A5의 상태이므로 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} s_0^2 - V_0^2 = 4a_0^2 \sinh^2 \left( \frac{H_0}{2a_0} \right) \\ V_0 = 2a_0 \sinh \left( \frac{2x_B + H_0}{2a_0} \right) \sinh \left( \frac{H_0}{2a_0} \right) \\ l_0 = a_0 \sinh \left( \frac{x_B + H_0}{a_0} \right) \end{cases} \quad (\text{A2.9})$$

위의 식으로  $s_0$ 와  $l_0$ 를 구할 수 있으며,  $x_i \leq H_0$ 이면 Fig. A6의 상태로 되기 때문에 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} l_0 = s_i \\ s_0 = l_0 + (H_0 - x_i) \end{cases} \quad (\text{A2.10})$$

이 때, A점에서 초기장력의 연직방향분력  $T_{V0}$ 는  $T_{V0} = \omega l_0$ 로 계산된다.

다음으로, A점이  $\Delta H, \Delta V$ 만큼 운동하여 A'점으로 이동한 상태에서 계류라인의 장력을 고찰한다. 이 상태에서도  $s_0$ 가 불변이기 때문에 먼저  $V = V_0 + \Delta V$ 를 만족하면서 B점과 C점이 포개지게 되는  $A_j$ 를 구한다. 이 때에  $A_j$ 점의 횡좌표를  $H_j = H_0 + \Delta H_j$ 로 나타내면 다음의 관계식이 얻어질 수 있다.

$$\begin{cases} a_j = (s_0^2 - V_0^2)/2V \\ H_j = a_j \cosh^{-1} \left( \frac{V}{a_j} + 1 \right) \end{cases} \quad (\text{A2.11})$$

이 상태는 B점(=C점)에서 바로 접하고 있는 상태이며, 또한 H를 일정하게 유지하면서  $A_j$ 점을  $\Delta H' = \Delta H - \Delta H_j$ 만큼 이동시키면 A'으로 되기 때문에 만약에  $\Delta H' > 0$ 이면 계류라인은 분명히 Fig. A5의 상태로 되므로 다음의 식이 성립된다.

$$\begin{cases} s_0^2 - V^2 = 4a^2 \sinh^2\left(\frac{H}{2a}\right) \\ V = 2a \sinh\left(\frac{2x_B + H}{2a}\right) \sinh\left(\frac{H}{2a}\right) \\ l = 2a \sinh\left(\frac{x_B + H}{a}\right) \end{cases} \quad (\text{A2.12})$$

위의 식(A2.12)의 세 번째 식으로부터  $a$ 와  $l$ 을 구할 수 있다. 역으로,  $\Delta H' \leq 0$ 이면 Fig. A6의 상태가 되므로 다음의 관계식이 줄어들 수 있다.

$$\begin{cases} V = a \left( \cosh \frac{H - s_0 + \sqrt{V(V + 2a)}}{a} - 1 \right) \\ l = \sqrt{V(v + 2a)} \end{cases} \quad (\text{A2.13})$$

위의 식(A2.13)의 두 번째 식으로부터  $a$ 와  $l$ 을 구할 수 있다. 이로부터 A'점에서 계류라인의 장력의 수평 및 연직방향성분은 다음의 식으로 된다.

$$\begin{cases} T_H = \omega a \\ T_V = \omega l \end{cases} \quad (\text{A2.14})$$

따라서, 변위에 대한 반력의 증분은 초기설정시의 힘과의 차를 취함으로써 각각 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} P_H = -\omega (a - a_0) \\ P_V = -\omega (l - l_0) \end{cases} \quad (\text{A2.15})$$

### A2.3 계류라인에 있어서 선형반력의 계산방법

$\Delta V, \Delta H$ 가 미소한 범위에서는 선형스프링상수를 갖는 것으로써 반력을 근사할 수 있다. 이 선형스프링력은 계류라인의 초기설정상태로부터 이하와 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{cases} P_H = -(K_{HH}\Delta H + K_{VH}\Delta V) \\ P_V = -(K_{VV}\Delta V + K_{HV}\Delta H) \end{cases} \quad (\text{A2.16})$$

$$\begin{cases} K_{HH} = w \frac{\sinh \bar{D}}{Q} \\ K_{VV} = w \frac{\{\bar{D} \cosh \bar{X} \cosh (\bar{X} + \bar{D}) - \sinh \bar{D}\}}{Q} \\ K_{HV} = K_{VH} = w \frac{\{\cosh \bar{X} (\cosh \bar{D} - 1) + \sinh \bar{X} \sinh \bar{D}\}}{Q} \end{cases} \quad (\text{A2.17})$$

여기서,

$$\begin{cases} Q = \bar{D} \sinh \bar{D} - 2 (\cosh \bar{D} - 1) \\ \bar{D} = H_0/a_0 \\ \bar{X} = x_{B0}/a_0 \end{cases} \quad (\text{A2.18})$$

또한,  $x_{B0}$ 는 초기상태에 있어서  $x_B$ 의 값을 의미하며, 만약 초기상태가 Fig. A6의 상태이면  $x_{B0} = 0$ 으로 둔다.

이와 같이 선형근사로 처리하는 경우에는 계류라인의 반력인 식(A2.5)를 용이하게 처리할 수 있으며, 계류라인을 전후좌우 대칭으로 설치하는 경우에는 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{cases}
G_x = K_{xx}x_G + K_{x\theta}\theta \\
G_y = K_{yy}y_G + K_{y\varphi}\varphi \\
G_z = K_{zz}z_G \\
G_\varphi = K_{\varphi\varphi}\varphi + K_{\varphi y}y_G \\
G_\theta = K_{\theta\theta}\theta + K_{\theta x}x_G \\
G_\psi = K_{\psi\psi}\psi
\end{cases} \quad (\text{A2.19})$$

여기서,  $K_{ij}$  ( $i, j = x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ )는 계류라인의 선형스프링상수를 의미하며, 계류라인 1본의 선형스프링상수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases}
K_{xx} = K_{HH}\cos^2\alpha_0 \\
K_{x\theta} = \left(K_{HV}\frac{L}{2} + K_{HH}z_0\cos\alpha_0\right)\cos\alpha_0 \\
K_{yy} = K_{HH}\sin^2\alpha_0 \\
K_{y\varphi} = \left(-K_{HV}\frac{B}{2} - K_{HV}z_0\sin\alpha_0\right)\sin\alpha_0 \\
K_{zz} = K_{VV} \\
K_{\varphi\varphi} = K_{VV}\left(\frac{B}{2}\right)^2 + 2K_{HV}\frac{B}{2}z_0\sin\alpha_0 + K_{HH}z_0^2\sin^2\alpha_0 \\
K_{\varphi y} = \left(-K_{HH}z_0\sin\alpha_0 - K_{HV}\frac{B}{2}\right)\sin\alpha_0 \\
K_{\theta\theta} = K_{VV}\left(\frac{L}{2}\right)^2 + 2K_{HV}\frac{L}{2}z_0\sin\alpha_0 + K_{HH}z_0^2\cos^2\alpha_0 \\
K_{\theta x} = \left(K_{HV}\frac{L}{2} + K_{HH}z_0\cos\alpha_0\right)\cos\alpha_0 \\
K_{\psi\psi} = K_{HH}\left(\frac{L}{2}\sin\alpha_0 - \frac{B}{2}\cos\alpha_0\right)^2
\end{cases} \quad (\text{A2.20})$$

여기서,  $z_0$ 는 중심에서 부체계류점까지의 연직거리로 계류점이 중심보다 위에 있는 경우에는 (+), 계류점이 중심보다 아래에 있는 경우에는 (-)를 취한다.

## 감 사 의 글

언제부터인가 『盡人事待天命』이란 故事成語를 좋아하게 되었습니다. 대학원생활과 직장생활을 병행하는 가운데 이에 합당한 생활을 하였는지 반문해 봅니다. 특히 지난 1년간은 그 어느 해 보다는 직장일로 많이 바빴던 생활 속에서 여러분의 도움으로 논문을 매듭하게 되었으며, 일련의 과정에서 너무나도 많은 부분에서 부족함을 느끼는 기간이기도 하였습니다.

이 논문이 완성되기까지 끊임없는 지도편달을 아끼지 않으신 김도삼 교수님께 먼저 고개 숙여 감사의 마음을 전합니다. 그리고 더 좋은 논문이 될 수 있도록 먼 길까지 왕립 하셔서 세밀하게 검토하고 지도해주신 경상대학교 배기성 교수님, 허동수 교수님께 감사를 드립니다. 각별한 지도와 조언 해 주신 김태곤 교수님, 경갑수 교수님의 은혜에 고마움을 전합니다. 또한 대학원 생활동안 많은 관심으로 지켜봐주신 이중우 교수님과 김태형 교수님께도 감사의 뜻을 전합니다.

많은 시간동안 논문의 완성을 위하여 밤낮으로 고생을 함께 한 최낙훈, 김창훈, 오윤석, 이상기씨의 해안공학연구실원의 도움에 감사의 마음을 전하며, 해안 및 항만 분야로 공부 할 수 있도록 인도해 주시고 많은 조언을 아끼지 않으신 이봉재 박사님께 고마운 마음을 전합니다.

직장생활을 하면서도 공부 할 수 있도록 격려와 지도를 아끼지 않으신 박대석 영도구청장님, 윤여목 부구청장님을 비롯한 영도구의 간부 및 직원여러분과 행자부의 배임태 부이사관님, 부산광역시의 마전기 부이사관님과 권기욱, 안병일 국장님, 김판섭, 손종주, 문양식 과장님과 더불어 건설과 동료직원여러분께 감사를 드립니다.

오늘의 이 결실이 있기까지 격려해주시고 보살피 주신 모교의 은사님과 모임에 참석치 못하더라도 기꺼이 배려해주신 친구들, 모임의 회원분들, 친척분들, 그리고 동생들에게 가슴속 깊이 고마운 마음을 전합니다.

또한 공부 잘 할 수 있게 뒷바라지 하시느라 어려운 환경에서도 여태껏 직장생활 하시는 아내와 근 80여생을 오직 자식위해 기도해 주신 어머니, 언제나 든든하고 믿음직한 두 아들 원재, 항재에게 고마움을 전하면서 그간 도와주시고 격려해주신 많은 분들께 보답코자 더욱더 노력하고 정진하는 자세로 생활할 것 을 다짐해 봅니다.

2005년 8월 장마철 소낙비가 내리는 날  
절영도 아치섬에서 윤 희 면 드림